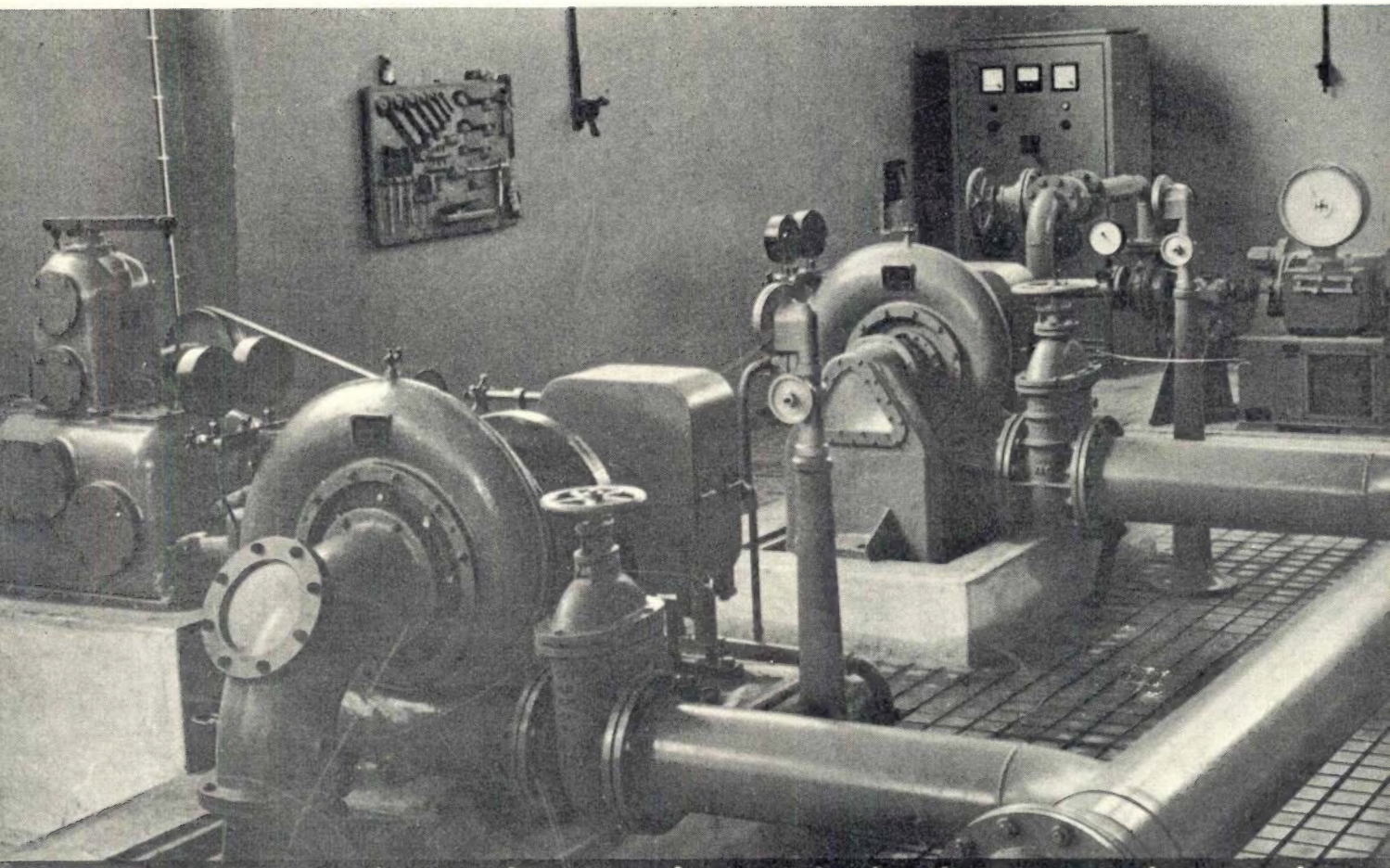
técnica



383

associação dos estudantes do instituto superior técnico

dezembro 1968

revista de engenharia

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40
(«Heliaço» e «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA
Ra = 2400 kg/cm²
e
Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente

HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

TOPOGRAFIA GERAL

2.º Volume

Pelo Eng.º A. C. XEREZ

Nova edição revista e actualizada

Preço 150$00

Desconto: 10% aos assinantes

Pedidos à Técnica

7.000 obras realizadas

coberturas
perfis especiais
vigas pré-esforçadas
pavimento trief
protecção de segurança

materiais novobra

pavimentos
em betão pré-esforçado
(homologados pelo Lab. Nac. de Engenharia Civil)

SOCIEDADE DE PRÉ-FABRICAÇÃO E OBRAS GERAIS NOVOBRA, LDA.
AV. EST. UNIDOS DA AMÉRICA, 100 - 5.º D.º - TEL. 774832 / 771603 - LISBOA 5

CIMENTO SECIL

Fábrica:
Outão — Setúbal
Telef. 228824/5

Escritório:
R. do Comércio, 56-3.º
LISBOA 2
Telef. 328201/2/3

técnica

NÚMERO 383 DEZEMBRO DE 1968 ANO XLIII VOLUME XXXI PUBLICAÇÃO MENSAL

Corpo Redactorial

João M. Pereira
João Soares Alves
Rui Coutinho Torrinha
Silvério de Sousa Mendes

Editor e Proprietário

Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico

Redacção e Administração

Avenida Rovisco Pais
Telefone 77 54 49
Lisboa 1

Assinaturas

		5 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	—	70$00	130$00
Ultramar, Brasil e Espanha	—	80$00	140$00
Estrangeiro	—	90$00	150$00

Número avulso — 20$00

Não se publica em Agosto e Setembro.

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Composto e impresso na Tipografia Jorge Fernandes, Lda. — Rua da Cruz dos Poiais 103 — Lisboa

SUMÁRIO

115 *MANUEL ROCHA* — **New techniques for the determination of the deformabilily and state of stress in rock masses.**
Novas técnicas para a determinação «in situ» da deformabilidade e do estado de tensão em materiais rochosos.

131 *REBELLO DA SILVA* — **Resultados de ensaios efectuados no Laboratório de Hidrodinâmica do I. S. T. com uma turbina Pelton.**
Results of essays made in the Hydromecanics Laboratory I. S. T. with a Pelton turbine.

141 *ALEXANDRE CERVEIRA* — **Testes estatísticos sobre a distribuição de probabilidades da população amostrada.**
Hypothesis testing about the probability distribution of the sampled population.

149 *J. MADEIRA COSTA* — **Dimensionamento de secções de betão armado ao esforço transverso.**
Diagonal tension reinforcement of concrete sections

155 *VIRGÍNIA LOUREIRO* — **Matérias tanantes vegetais.**
Vegetable tanning materials.

161 **Vida escolar e associativa**
Luís Moniz Pereira — Cibernética — Epistemologia.

148 **Notas Informativas**
Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional.

Bibliografia

CAPA: Laboratório de Hidrodinâmica do I. S. T. — Aspecto parcial de alguns bancos de ensaio

ÍNDICE ALFABÉTICO DOS ANUNCIANTES

	Pág.
A. Johnson & Co (Portugal), Ltd.	XXVIII
AEG	XV
Aguiar e Melo	XXVII
Asea Eléctrica	V, VII, XXIX e XXXI
Cerâmica de Vale de Lobos, Lda.	XX
Cimento Secil	2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos	VI
Construções Técnicas	XVII
Dial	XX
Electro-Arco, Ltd.ª	II
Empresa de Cimentos de Leiria	XXXII
Empresa Electro Cerâmica	XXXI
Empresa de Produtos Asfálticos	X
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Lda.	3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos	XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações	XVI
Fábrica Portugal	XXX
Fanafel	XVI
Fundações Franki, Lda.	I
Guedes & Almeida, Lda.	VIII
Harker Sumner	XXII
Heliaço	2.ª da capa
INA	XXV
I. S. T.	XXV
Isoluz	XX
J. J. Silva & Irmão	V
J. F. Azevedo e Silva	IV
J. Roma	VII
Jayme da Costa, Lda.	XIX
Johann Keller	V
LUSOTECNA	XIV
MAGUE	XIII
Novobra, Lda.	2.ª da capa
Química Hoechst	XXIX
Rotring	XXVI
Siemens	XXI
Soc. Const. Amadeu Gaudêncio	XXV
Soc. Brown Boveri	4.ª da capa
Soc. Michaelis de Vasconcelos	XII
Sociedade Portuguesa Cavan	VI
Somague	XXXII
Sondagens e Fundações A. Cavaco	II
Sondagens Ródio, Lda.	VII
Sopecate	II
Standard Eléctrica	IX
STET	XXIII
Wild Portugal, Lda.	III

Prédio CARDOSO & REIS — Lourenço Marques

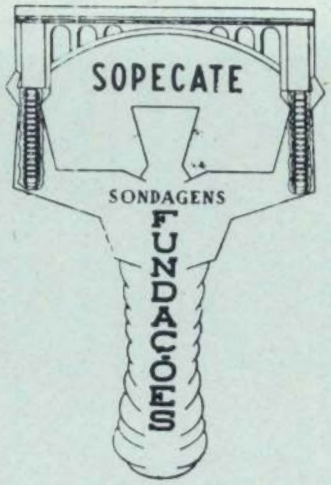
Assente sobre Estacas FRANKI

FUNDAÇÕES FRANKI L.DA

RUA BRAAMCAMP, 13-3.º — LISBOA 1 — TEL. P. P. C. 53 41 12/3/4 — ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI — LISBOA

PRÉDIO SANTOS GIL, 6.º ANDAR — SALA 10 — TEL. 9 11 67 — CAIXA POSTAL 1397

ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI—LOURENÇO MARQUES



sopecate

sondagens - fundações

ESCRITÓRIO: RUA DO ARSENAL 146 2.º TELEFONES 3 40 10 - 32 02 08 LISBOA

- ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA
- SONDAGENS
- REBAIXAMENTO DE NIVEIS AQUÍFEROS
- FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA, 62, R/C ESQ. — LISBOA - 1

TELEF. 56 11 71/72/73

ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS ✦ POSTOS ✦ ACESSÓRIOS

PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

*

MATERIAL APROVADO PELOS

LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

—

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93

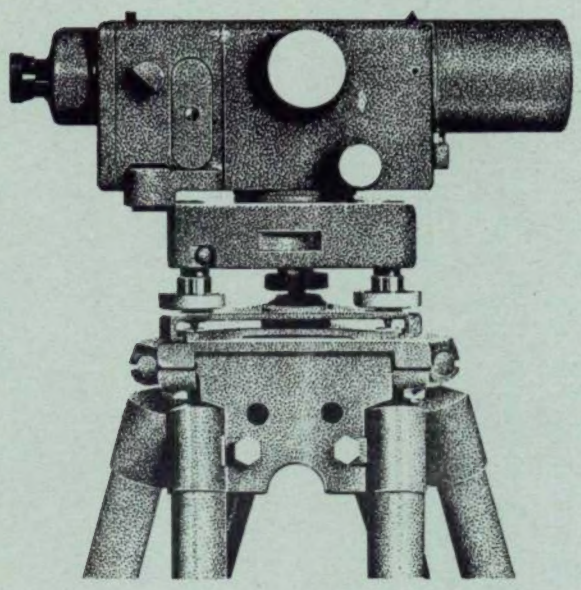
FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33

PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73

O novo Nível automático de engenheiro

WILD NAK 2

com círculo horizontal



WILD
HEERBRUGG

Para nivelamentos de média e grande precisão; com micrómetro de lâmina de faces plano-paralelas para nivelamentos de grande precisão.

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo: ± 1,5 mm

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo com micrómetro: ± 0,4 mm

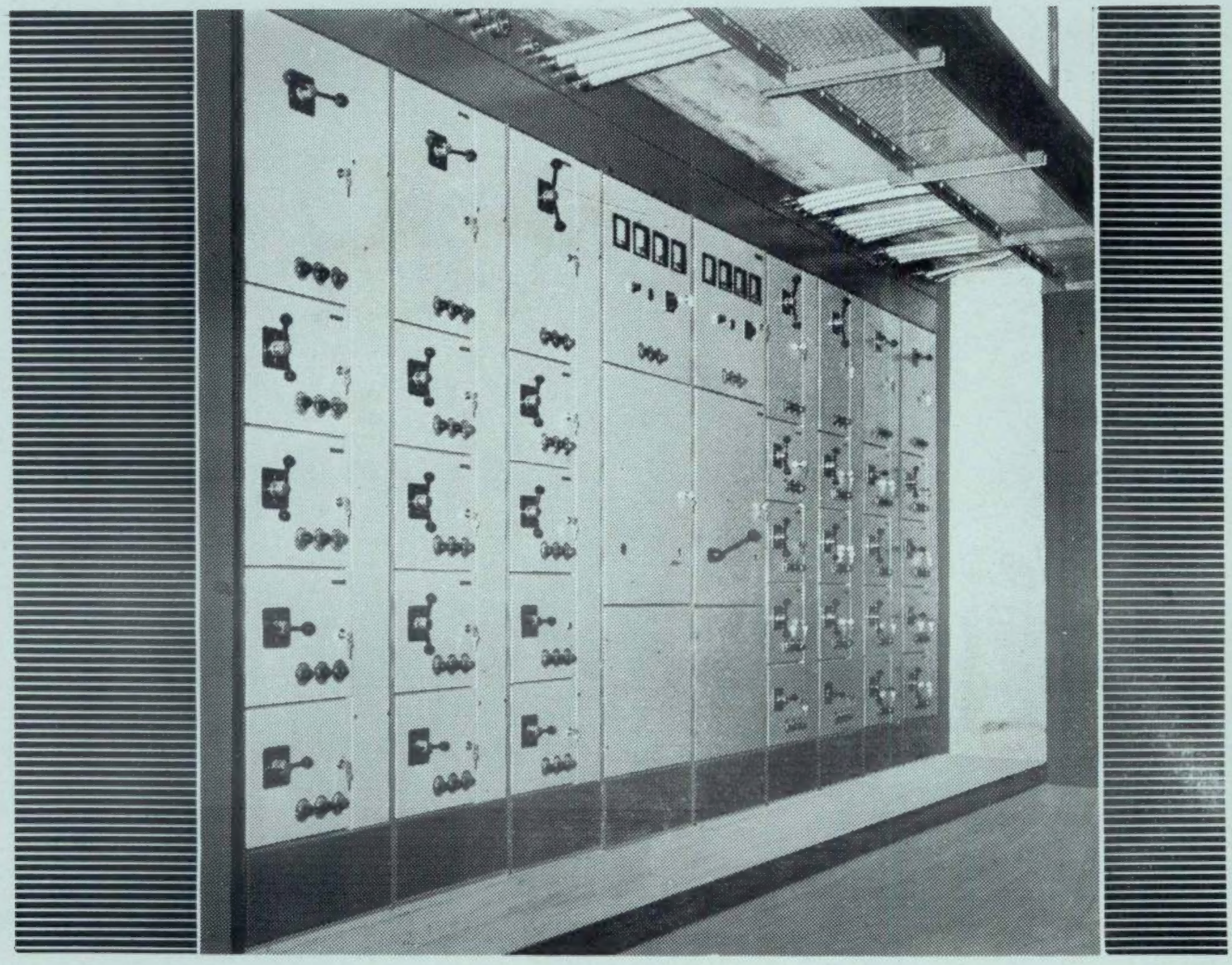
Luneta de 30 × de aumento com imagem direita de observação

Solicitem catálogo ou demonstração aos representantes exclusivos

WILD PORTUGAL, LDA.

PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8
LISBOA - 2 — TELEFONE 68 91 12

AO SERVIÇO DA INDUSTRIA NACIONAL



Quadro Geral da ROL-Rolamentos Portugueses SARL

Inteiramente projectado, construído e montado pelos nossos serviços

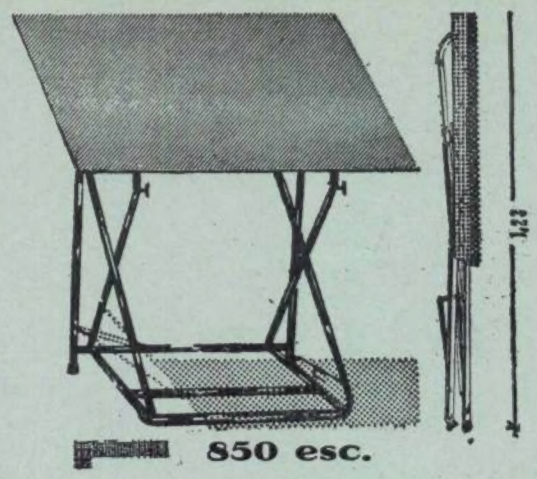
Equipamento de corte e protecção SOCOMEC

Painéis normalizados e pré-fabricados

JF

J.F. DE AZEVEDO E SILVA & C.ª L.DA

Rua S. Francisco Sales, 2 Telef. 654165 · Lisboa-1



850 esc.

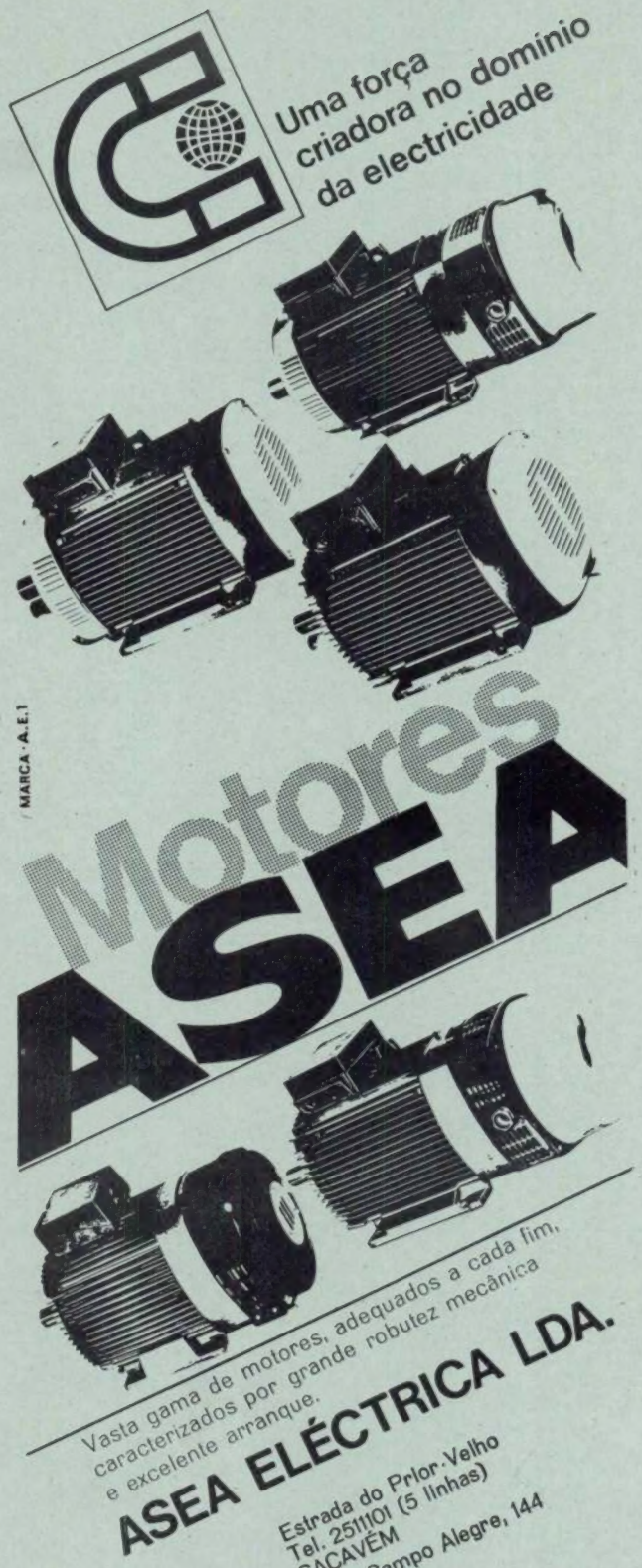
CARACTERÍSTICAS: Tubo de aço, articulado em qualquer posição, várias inclinações, fàcilmente transportável, não ocupa espaço quando fechado, prancheta de 1,20 × 0,80 de madeira, em tela. Pintura de estufa.

Em exposição, outros modelos de madeira e metálicos e todo o material de consumo e equipamento de desenho, escritório e papelaria

Distribuidores exclusivos, em Lisboa, do estirador da ***Fábrica Olaio***

J. J. SILVA & IRMÃO, LDA.

rua silva carvalho 232-b · lisboa · telefone 652750 / 680671



O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

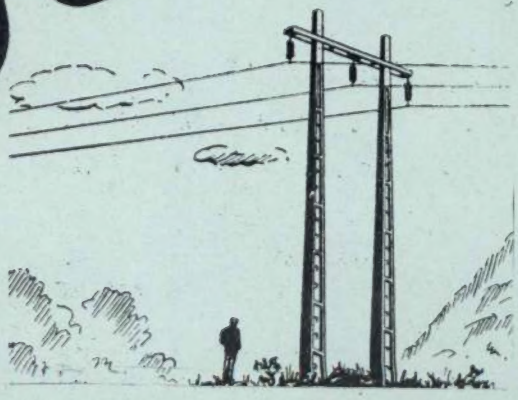
CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

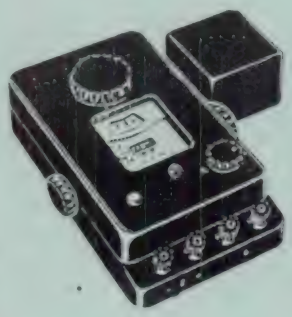
POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS
COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

SOCIEDADE PORTUGUESA **Carvam**



RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A-LISBOA-1-TELEF. 47812-50129

- SOLDADURA ELÉCTRICA
- MATERIAL DE PROTECÇÃO



Aparelhagem de medidas eléctricas

- indicadora
- reguladora
- registadora

J. ROMA, L.DA

P. da Figueira, 12, 1.º — LISBOA Tel. 865151

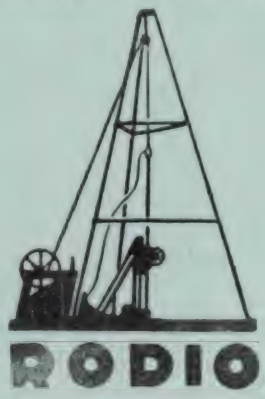
P. do Município, 309-6.º S 3 — PORTO Tel. 0236732

SONDAGENS RÓDIO, L.DA

LISBOA

RUA DE S. BENTO, 644-3.º

Telefones: 68 80 96/7/8 ✦ Telegramas: SETANSOL



SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
ESTACAS GUNITA
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS
CONGELAÇÃO DO TERRENO
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ABAIXAMENTO DO LENÇOL DE ÁGUA

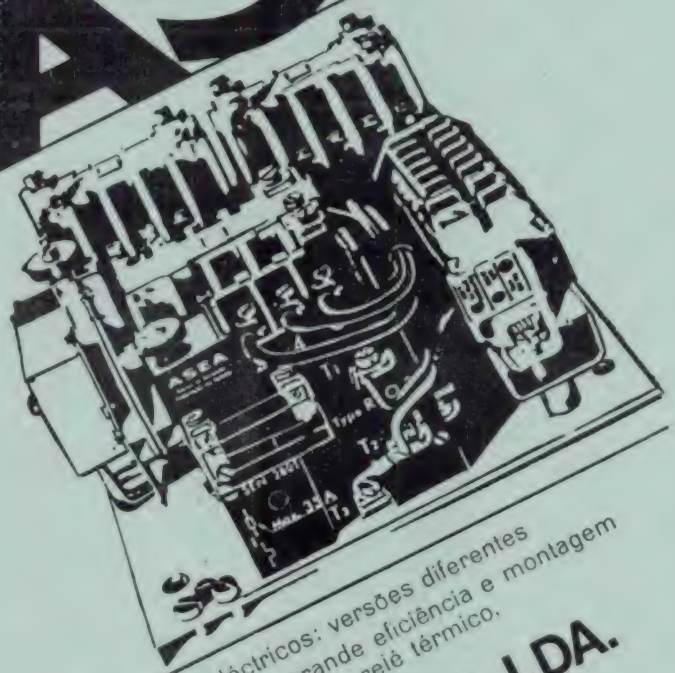
—//—

Engenheiro Consultor: **Walter Weyermann**

MARCA · A.E.2

Uma força criadora no domínio da electricidade

Arrancadores ASEA



Para motores eléctricos: versões diferentes de arrancadores de grande eficiência e montagem fácil, com temporizador e relé térmico.

ASEA ELÉCTRICA LDA.

Estrada do Prior-Velho
Tel. 2511101 (5 linhas)
SACAVÉM

R. do Campo Alegre, 144
Tel. 67239
PORTO

WABCO

WESTINGHOUSE
AIR BRAKE COMPANY

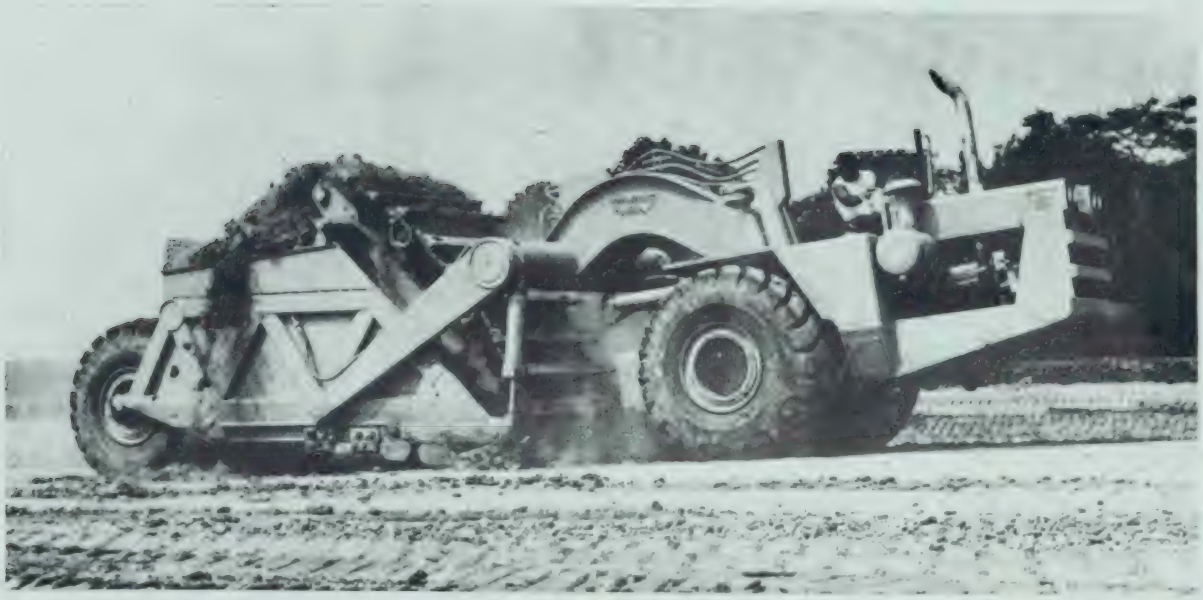
Construction Equipment Division
Peoria (Illinois) 61601

MOTO-SCRAPERS AUTO-CARREGADORES

CAPACIDADE DE 11, 21 E 31 JARDAS CÚBICAS

NÃO NECESSITA DE TRACTOR PARA EMPURRE!
UMA SÓ MÁQUINA... UM SÓ OPERADOR...

Escarifica... Carrega... Transporta... Descarrega... Em terrenos de toda a natureza!

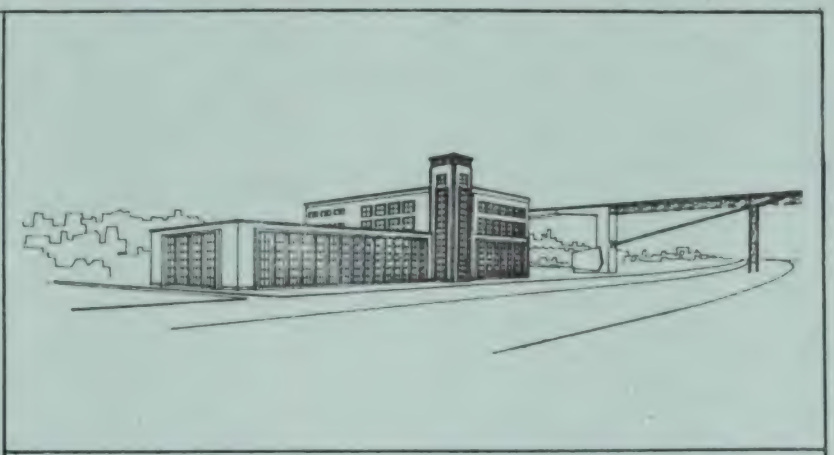


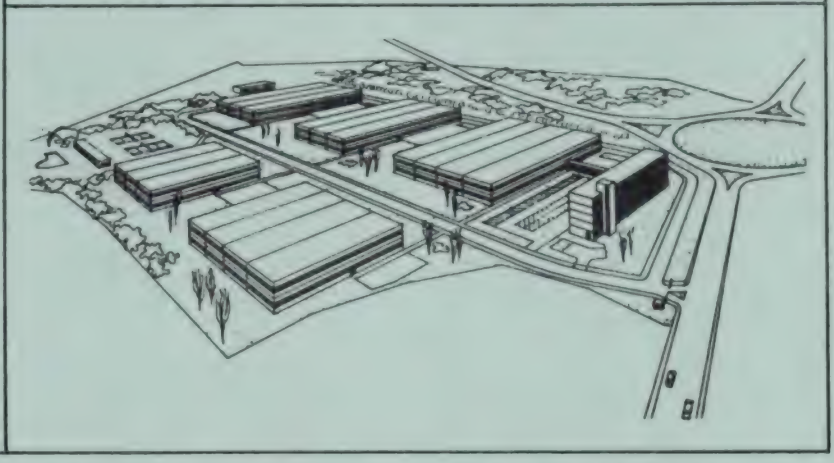
DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

GUEDES & ALMEIDA LDA.

Rua Áurea, 181-2.º — LISBOA-2 — TELEFS. 32 50 80 e 32 78 45

Através das suas organizações de: LISBOA • LUANDA LOBITO • NOVA LISBOA e Agências de: PORTO, GUINÉ, S. TOMÉ E PRÍNCIPE e CABO VERDE fornecerá todos os elementos técnicos, para criteriosa escolha, assistência técnica e sobresselentes.
A1-a





O CRESCIMENTO COMO FACTOR DE DESENVOLVIMENTO

Tal como as árvores, quando bem cuidadas, criam raízes, crescem, ramificam-se e dão bons frutos, assim as empresas, quando bem dirigidas, definem uma posição, desenvolvem-se, diversificam as suas actividades e lançam nos mercados produtos de alta qualidade.

A Standard Eléctrica, pioneira da indústria das Telecomunicações e Electrónica em Portugal, que em 1932 não dispunha de mais de uma escassa dezena de empregados, conta hoje com mais de 2200 pessoas nas suas fábricas de Lisboa, Cascais e Luanda. O ritmo de crescimento e expansão tem sido de tal modo elevado que o volume de vendas passou de 30 000 contos em 1957 para 300 000 em 1967, prevendo-se que em 1970 a produção total da Standard Eléctrica atinja o valor de 1 500 000 contos, dos quais 1 000 000 se destinam à exportação.

A Standard Eléctrica é, pois, um valor positivo na indústria nacional, que tem como base o elevado nível técnico e profissional e ainda o magnífico esforço de todos os que nela trabalham.

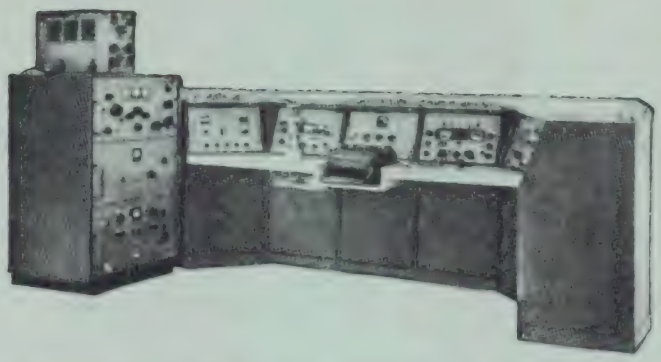
Standard Eléctrica **ITT**

PARA COLAGEM DE TACOS DE MADEIRA USE:

Também próprio para:
impermeabilizar terrenos,
paredes, fundações, etc.

FÁBRICA EM SACAVÉM

RUA FILIPE FOLQUE-10 1º— LISBOA
TELEF. 53 01 56—TELEG. EPALDA-LISBOA



Comunicações

equipamentos
e sistemas completos

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

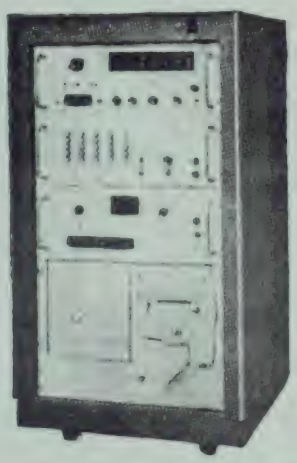
THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION

HEWLETT hp PACKARD

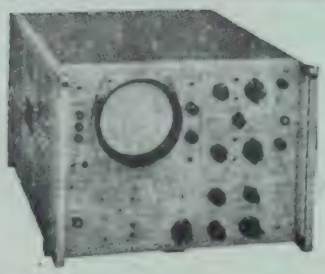
aparelhagem electrónica de medida e registo

Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador digital Dymec



Registador Sanborn



Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

TELECTRA EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.

Os pára-raios Oerlikon...

... estão na vanguarda do progresso e protegem instalações em todo o mundo

Corrente de descarga 5 kA

RV
380 & 500 V

Descarga de longas linhas em vazio, protecção de postos completos, transformadores, alternadores ou consumidores ligados a linhas aéreas. Para cada função, o pára-raios apropriado.

OERLIKON

VG/WG
6 – 37 kV

Corrente de descarga 5 e 10 kA respectivamente Ondas rectangulares 75 A 1000 µs e 150 A 2000 µs

WGE
40 – 73 kV

Corrente de descarga 10 kA Ondas rectangulares 150 A 2000 µs Membrana anti-explosão

WM/WMR
50 – 500 kV

Insuflação magnética Corrente de descarga 10 kA, Ondas rectangulares 1000 A 2000 µs Membrana anti-explosão

Para indicações mais amplas consultar os nossos representantes Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, Ltda. Porto e Lisboa

Ateliers de Construction Oerlikon · Zurich (Suiça)

Representantes para Portugal e Ultramar: Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, Lda., Porto e Lisboa

técnica

NUMERO 383 DEZEMBRO DE 1968 ANO XLIII VOL. XXXI PUBLICAÇÃO MENSAL

C. D. U. 624.131.388

NEW TECHNIQUES FOR THE DETERMINATION OF THE DEFORMABILITY AND STATE OF STRESS IN ROCK MASSES *

By MANUEL ROCHA **

RESUMO

Apresentam-se neste trabalho as novas técnicas desenvolvidas no LNEC, nos últimos anos, para a determinação «in situ» da deformabilidade e do estado de tensão em maciços rochosos.

Quanto à deformabilidade, apresenta-se um dilatómetro para furos de sondagem com diâmetros de 7,6 cm que pode ser utilizado em furos com água, a profundidades mesmo superiores a 100 m. Para o ensaio de grandes volumes de maciços rochosos descreve-se a técnica dos macacos planos delgados introduzidos em fendas abertas com um disco de diamante. Esta técnica permite a aplicação expedita de forças de milhares de toneladas a superfícies de vários metros quadrados.

Quanto à determinação das tensões, descreve-se um defórmetro tridimensional para a determinação completa do estado de tensão, inicial ou induzida, por meio de observações efectuadas num só furo de sondagem, com qualquer direcção. Esta técnica pode ser empregada até grandes profundidades, mesmo em furos com água. Menciona-se ainda a determinação do estado de tensão junto à superfície dos maciços rochosos por meio de macacos hidráulicos delgados que se introduzem em fendas abertas com discos de diamante.

Apresentam-se os resultados da aplicação de novas técnicas de laboratório e de campo, que permitem apreciar a fidelidade e precisão e fazem ressaltar o seu interesse prático.

SYNOPSIS

New techniques developed in recent years by the LNEC for the «in situ» determination of the deformability and state of stress in rock masses are presented.

Regarding deformability, a dilatometer for 7.6 cm diameter boreholes is presented which can be used in water filled boreholes down to depths that may exceed 100 m. With regard to the testing of large volumes of rock masses, the technique of thin flat jacks is described. The jacks are introduced in slots cut by a diamond disc. This technique allows the expeditious application of loads of thousands of tons to areas having several square meters.

As to the determination of stresses, the strain tensor gauge is described for the complete determination of the state of stress, either initial or induced, by means of observation carried out in one single borehole, drilled in any direction. The technique can be used down to great depths, even in water filled boreholes. The determination of the state of stress near the surface of rock masses by means of thin flat jacks placed in slots cut with diamond discs is also referred.

Results of the application of the new techniques, both in the laboratory and in the field, are given allowing to assess the reliability and accuracy of these techniques and emphasize their practical interest.

1 — INTRODUCTION

Although rock masses generally have little deformability the behaviour of rigid structures, such as concrete dams, may depend much on the displacements undergone by the foundation. The knowledge of these displacements involves the characterization of the deformability of rock masses.

As it is known it is not possible except in few cases to characterize the deformability of rock masses using laboratory tests, because to be representative of the fracturing and heterogeneity usually occuring in rock masses, the specimens

* Paper presented at the International Symposium on Rock Mechanics-Madrid-Oct. 1968.

** Director, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

would have to be too large. Even the usual «in situ» jackloading tests do not yield in most cases satisfactory results because the rock mass in the tested zone is disturbed by the excavation and because the tested volumes are not yet representative of the rock mass.

To avoid these difficulties we developed the new thin flat jack technique described later, which allows the quick testing of large undisturbed volumes (Rocha, 1966)**.

Furthermore, the determination of the deformability of rock masses along boreholes, even during the preliminary geological studies, is recognized of great interest. So, we built a dilatometer which can operate in holes having a usual diameter in site investigations (Rocha, Silveira, Grossmann and Oliveira, 1966).

The way we now consider advisable to follow in the study of the deformability of a rock mass is: i) determination with the dilatometer of the deformability and zonation of the rock mass according the results obtained; ii) determination of the deformability of each zone by means of tests on large volumes with thin flat jacks; and iii) establishment of the correlation between the dilatometer test results and those of the flat jack tests in order to try to reduce the number of the latter and also to extend the information supplied by them to the zones of the rock mass which were only tested with the dilatometer.

In the study of a foundation it is also useful to know the initial state of stress of the rock mass, in addition to the usual characterization of the deformability and shear strength. The lack of expedite reliable methods to determine the initial state of stress is the reason, in our opinion, why it has not been considered as generally as it should. So, regarding foundation problems, which are the aim of the present Symposium, the initial state of stress may be of interest in the study of the rock mass shear strength, as this strength depends on the normal initial stress; in the assessment of the possibility of the occurrence of cracks in the rock mass when tensile stresses develop on account of the structure action (problem of the watertightness of grouting curtains); in the investigation of the occurrence of slabbing phenomena and rock bursts, particularly at the bottom of deep, narrow valleys; etc.

The technique we developed for the complete determination of the state of stress, either initial or induced, by means of observations in one single borehole (Rocha, 1966) is referred further on. The possibility of determining initial stresses near the surface by means of thin flat jacks, either simultaneously with the determination of the deformability through the test technique on large volumes already mentioned or through a similar technique (Rocha, Lopes and Silva, 1966) is also considered later.

In the present paper the different testing methods mentioned are briefly described and some results showing their interest are presented.

2 — DETERMINATION OF ROCK MASS DEFORMABILITY

2.1 — Dilatometer

The dilatometer developed by the LNEC was designed to meet the following requeriments: i) to be used in boreholes with a usual diameter in site investigations; the diameter considered was 76 mm; ii) to operate in holes with water; iii) to be used down to great depths, even above 100 m; iv) to apply radial pressures to the borehole wall up to 150 kg/cm^2; and v) to enable the measurement of deformations of four diameters at 45° with one another, to obtain information about the anisotropy of the rock mass. Besides it can de used in holes drilled in any direction, even horizontal.

Fig. 1 shows, schematically, a longitudinal section of the dilatometer as it is constructed now. The external diameter of the apparatus in the zone that applies the pressure is 74 mm, which corresponds to a clearance of 2 mm in relation to the diameter of the borehole; the diameter of the ends can be changed by means of rings with diameters adequate to the actual diameter of the borehole. By pumping water between the rubber membrane and the steel cylinder the wall of the hole is submitted to a uniform radial pressure, over a length of 54.5 cm. Once a test has been performed, to take the dilatometer out or to place it in a new test position one must take out the water which has been introduced to apply the pressure. This is done by a relief valve operated

** See bibliography at the end of the paper.

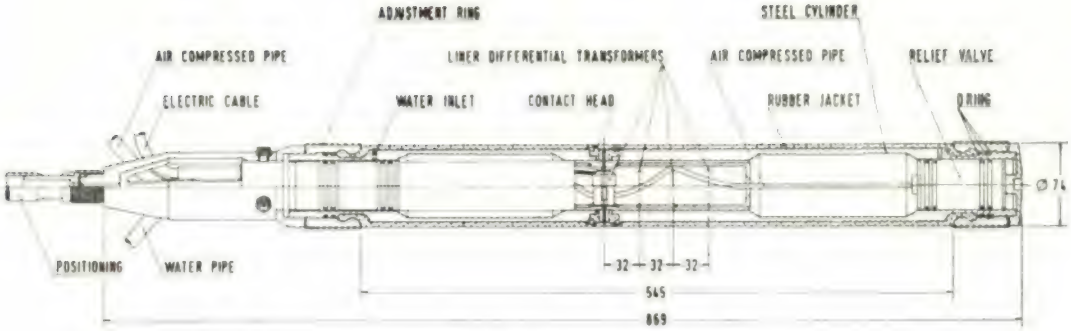


Fig. 1

by compressed air. The dilatometer is introduced into the borehole connected to steel rods which allow the depth and azimuth of the apparatus to be known.

To measure the deformations undergone by the four diameters at 45° differential transducers with a measuring range of about 5 mm and an accuracy of about 1 μ are used. The coil and core of each transducer are connected to steel rods the ends of which establish the borehole wall.

Fig. 2 shows the dilatometer, which weighs 12 kg, being lowered into a borehole and the equipment needed for its operation.

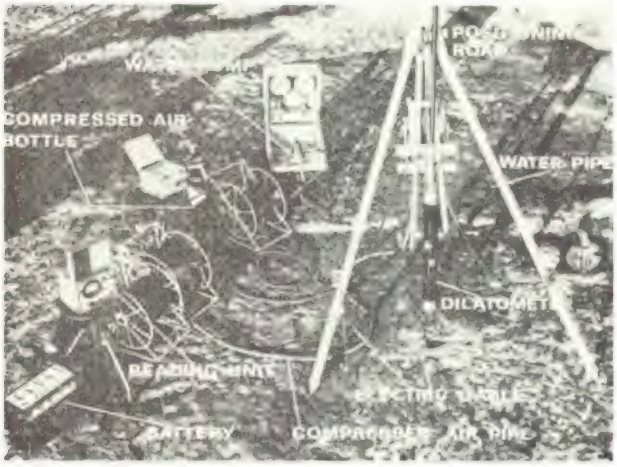


Fig. 2

The accuracy and reliability of the measurements made with the dilatometer manufactured by the LNEC have been assessed by tests carried out inside steel pipes. In these tests deformations read by the dilatometers are compared with the corresponding external diameters deformations, also read by differential transducers (Fig. 3).

Fig. 3

As a rule the program of the tests to be performed with the dilatometer depends on the problem to be solved and on the nature of the rock mass. It is usually advisable to carry out several loading/unloading cycles, to measure the deformations for different pressure values and to observe the creep of the rock mass under the maximum pressure values.

Fig. 4 shows the results obtained in a point of one of the boreholes along which deformability was determined with a view to the construction of an underground powerhouse, in a limestone rock mass. The borehole is vertical and the point is located at a depth of 92 m, under 75 m of water. Deformations read by the four transducers of the dilatometer in a series of three loading/unloading cycles, during which a pressure $p = 100$ kg/cm^2 was reached, are indicated in abscisse. The shape of the diagramas is rather regular and the cycles following the first are almost coincident and exhibit small permanent deformations. The deformation undergone by the borehole for the different values of the pressure can be

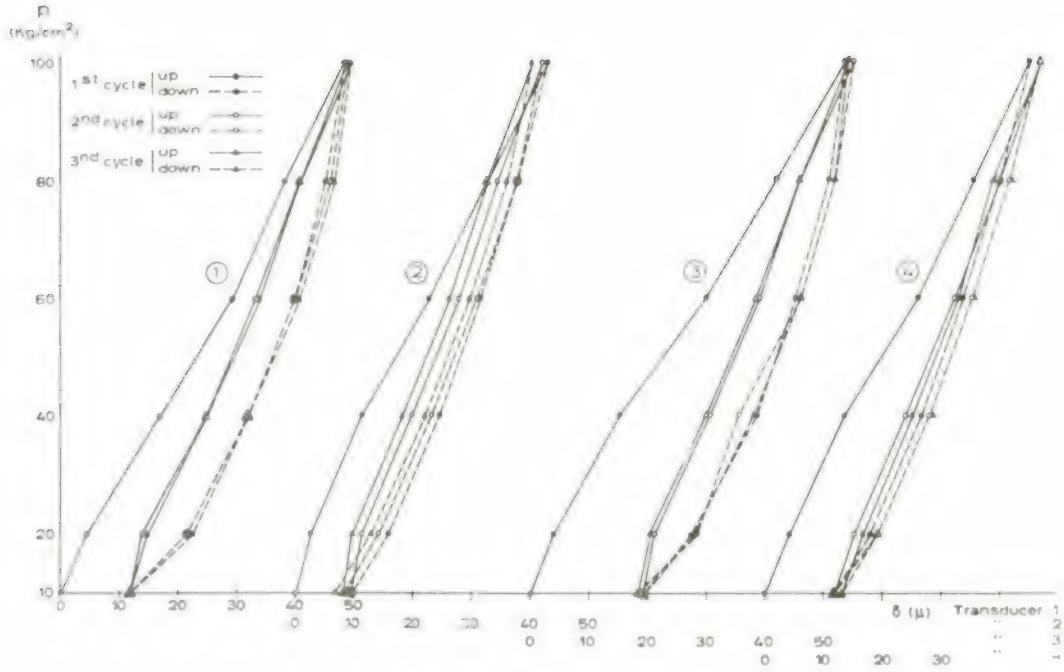


Fig. 4

observed in Fig. 5. The rock mass does not exhibit significant anisotropy at the point observed, but the shape of the curves makes us suspect the existance of fractures in the rock mass.

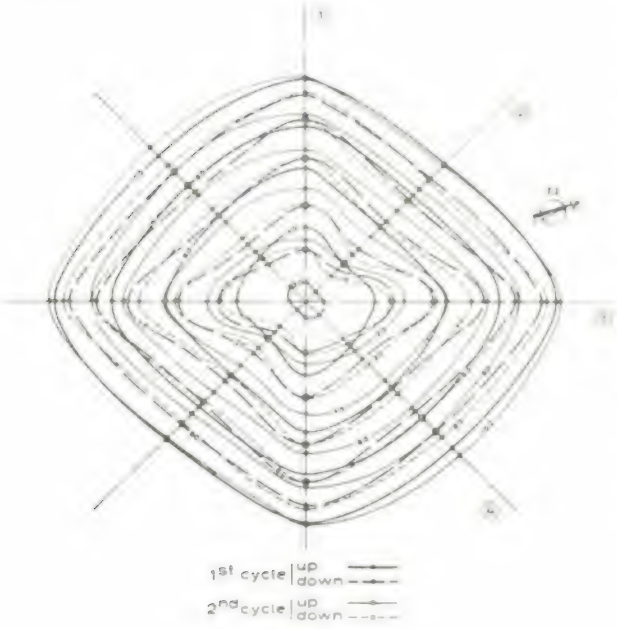


Fig. 5

Fig. 6 concerns one of the boreholes tested in the course of the study of a dam site in a sedimentary rock mass constituted by limestone and shale. The ellipses of the most probable deformations determined by the least square method, from the deformations read by the four transducers under pressure 100 kg/cm², are presented for six points of the borehole whose depths are indicated. The position of the ellipses is related to the geographic North of the site. For most of the boreholes, the values of the deformations observed show a good adjustment to an ellipsis. However, as the excentricity of the ellipses is small for most of the points where the best adjustment was found, the variation in direction of the axes observed from one point to the other should have little significance. The figure gives the values of the relation between the axes of the ellipses, which we have called coefficient of anisotropy.

Accepting isotropic and elastic behaviour for the rock mass, its Young's modulus E may be calculated by the expression of the theory of elasticity

$$E = 2a \frac{1 + \nu}{\Delta} p$$

$2a$ being the borehole diameter, Δ the diameter deformation when pressure p is applied, and ν the Poisson s ratio of the rock mass.

DEPTH (m)	DEFORMATION ELLIPSIS	COEFFICIENT OF ANISOTROPY	MODULUS OF DEFORMABILITY (kg/cm²)
7.75		1.36	176 500
14.10		1.69	155 550
15.50		1.04	181 250
28.00		1.15	201 500
29.00		1.20	232 750
30.60		1.74	258 250

Fig. 6

The influence of rock fractures on the deformations measured in boreholes is discussed in the work referred above (Rocha, Silveira, Grossmann and Oliveira, 1966).

For the test of the point at a depth of 92 m (Fig. 4), the mean value of the slope of the linear stretches of the diagrams corresponding to the second and third cycles is $\frac{p}{\Delta} = 1.2 \times \times 10^4$ kg/cm, hence $E = 111\,000$ kg/cm², if $\nu = 0.2$. For the other tests referred, the values of the modulus of deformability indicated in Fig. 6 were obtained, the value assumed for Δ being the mean value of the deformations measured in the four directions at 45°.

The results we have been presenting illustrate the usefulness of the dilatometer. The experience already gained permits to assert the high accuracy and reliability under field conditions of this apparatus.

As the volume of the rock mass involved in each test is small and therefore often not representative of the rock mass as regards deformability, the problem of the meaning of the results arises. Besides, the dilatometer develops in the rock mass a complex state of stress particularly tensile stresses that may cause fracturing influencing deformations in a way not yet well known. However, as it is possible to carry out many tests, almost a continuous determination of the deformability along boreholes, and the fact that the drilling of the holes as a rule only gives rise to a minor disturbance of the rock mass, it should be possible, at least in some cases, to submit the results to statistical processing allowing representative values of the deformability to be obtained. Having not yet enough experience to be able to form an opinion on the representativeness of the dilatometer tests, we think however that the results supplied constitute at least a valuable index of deformability and more than that a quality index of the rock mass. Besides, it should be stressed that there are some cases where only the dilatometer will make it possible to obtain a significant information about deformability. Such are the cases of points deep in rock masses, which can not to be reached by galleries, as is often the case in the study of tunnels and underground openings, or points located under river beds, etc.

2.2 — Thin flat jacks

The technique developed consists essencially (Fig. 7) in: i) opening with a diamond disc of

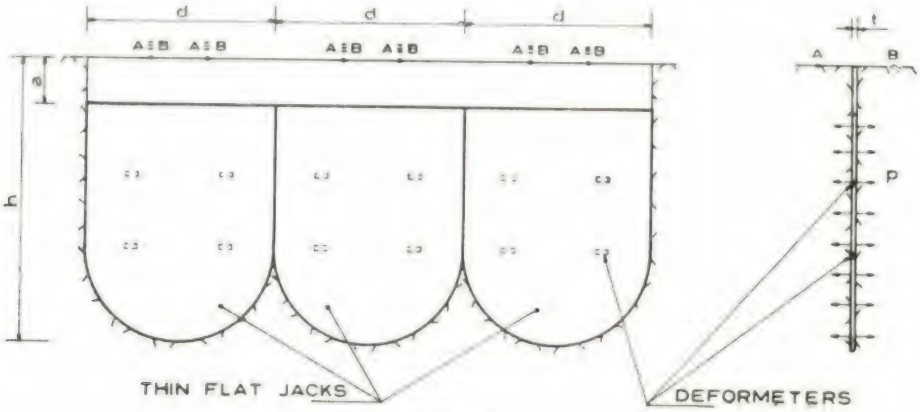


Fig. 7

diameter d, perpendicularly to the surface of the rock mass, a slot or a group of slots, contiguous and in the same plane, with a depth h and a thickness t; ii) introducing a thin flat jack with height $h-a$ into each slot; iii) applying the same pressure p in the jacks; iv) measuring the opening δ of the slots at some points, by deformeters inserted in the jacks themselves; and v) determination, based on diagrams p, δ, of deformability moduli.

To cut the slots a machine was developed which is shown in Fig. 8. It consists essentially of a 1 m diameter, 7 mm thick diamond disc mounted at the end of a pipe inside which is located the system that transmits the rotating movement to the disc. The forward movement of the disc is guided by two columns belonging to the structure that allows to fix the machine to the rock mass. To facilitate the cutting of the rock an alternate movement perpendicular to the forward movement is given to the disc, in its plan. In order to allow the opening of slots deeper than the radius of the disc a 17cm diameter hole is previously drilled using the same machine, into which is introduced the disc supporting pipe. The machine allows to cut $h = 1.5$ m deep slots, and even greater depths can be reached using an extensive support pipe.

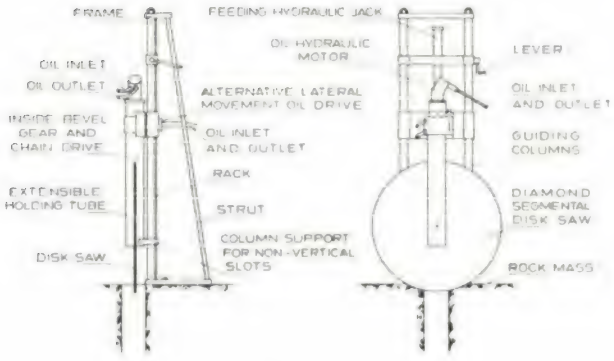


Fig. 8

Fig. 9 shows the machine and the system for operating the oil hidraulic motor, consisting of a pump moved by a petrol engine. The machine can be fixed in any position allowing to carry out tests in the required direction.

Fig. 9

Fig. 10 shows a flat jack being introduced in a slot where two others have already been placed. Two half cylinders are inserted into each borehole to support the flat jack. The height, a, of the unloaded area of the slots (Fig. 7) is chosen in accordance with the fracturing of the rock mass, so as to avoid failure near the surface when pressure is applied by the jacks. If the rock mass exhibits cavities or fractures into which the steel plate of the jacks may enter the slots should be filled with cement and the cuts repeated.

Fig. 10

The flat jacks that have been used are of the type indicated in Fig. 11. They allow the application of pressures even greater than 100 kg/cm^2.

Each flat jack contains four deformeters for measuring the opening of the slots. It is thus possible to obtain a mean value of the deformability modulus and to get information about the

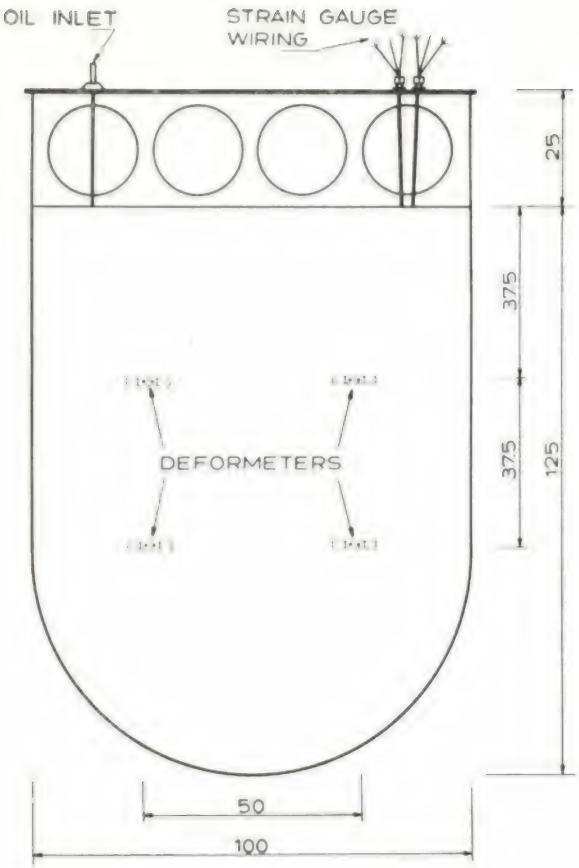


Fig. 11

heterogeneity of the rock mass. Each deformeter consists of a steel blade, where electric strain gauges have been mounted. The deformeters used have different measuring ranges, according to the expected opening of the slot.

The characterization of the deformability is made through a deformability modulus determined by assuming elastic behaviour for the rock mass. Besides it is assumed that a fracture occurs in the rock mass in the plane of the slot when the pressure is applied by the flat jacks. So, the behaviour of the rock mass may be considered as the elastic behaviour of a quarter of space under pressure p (Fig. 12). Deformability modulus E at a point P of the slot where a deformeter is located is determined according to the expression

$$E = c \frac{p}{\delta}$$

δ being the slot opening measured and c a constant, the value of which depends on the position, shape and size of the area under the pressure p and also on the position of P. This constant has the dimension of a length. Model tests on a large plaster block have been used to obtain the values of c. These tests show an increase of about 50 % on the displacements of the center of the loaded area, when this area moves from a position far from the edge of the quarter of space (Boussinesq's solution for the half space) to a position contiguous to that edge.

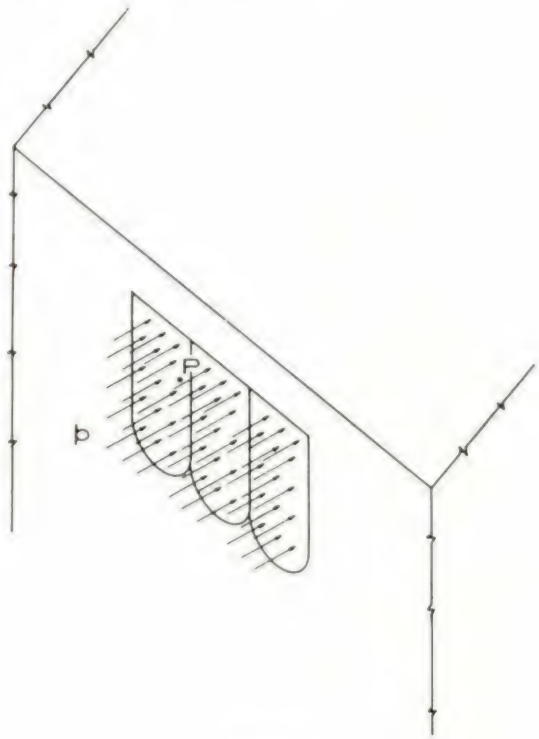


Fig. 12

The accuracy and reliability of the thin flat jack method have been confirmed by several tests that led to entirely satisfactory results.

We are going to refer in the first place results of tests on a very sound limestone with a high deformability modulus. These tests were carried out first in a single slot and afterwards in three contiguous slots, as in Fig. 7. The characteristics of the flat jacks used are indicated in Fig. 11, where $h = 125$ cm and $a = 25$ cm. Each slot 1.5 m deep was cut in about four hours, in spite of the hardness of the rock.

Slot openings at points P_1, P_2, P_3 and P_4, observed in the single slot test are presented in Figure 13. Two loading/unloading cycles were carried out with the jack in the position designated in the figure as direct. The diagrams are more regular than is usual in common jackloading tests, even with very compact rock masses.

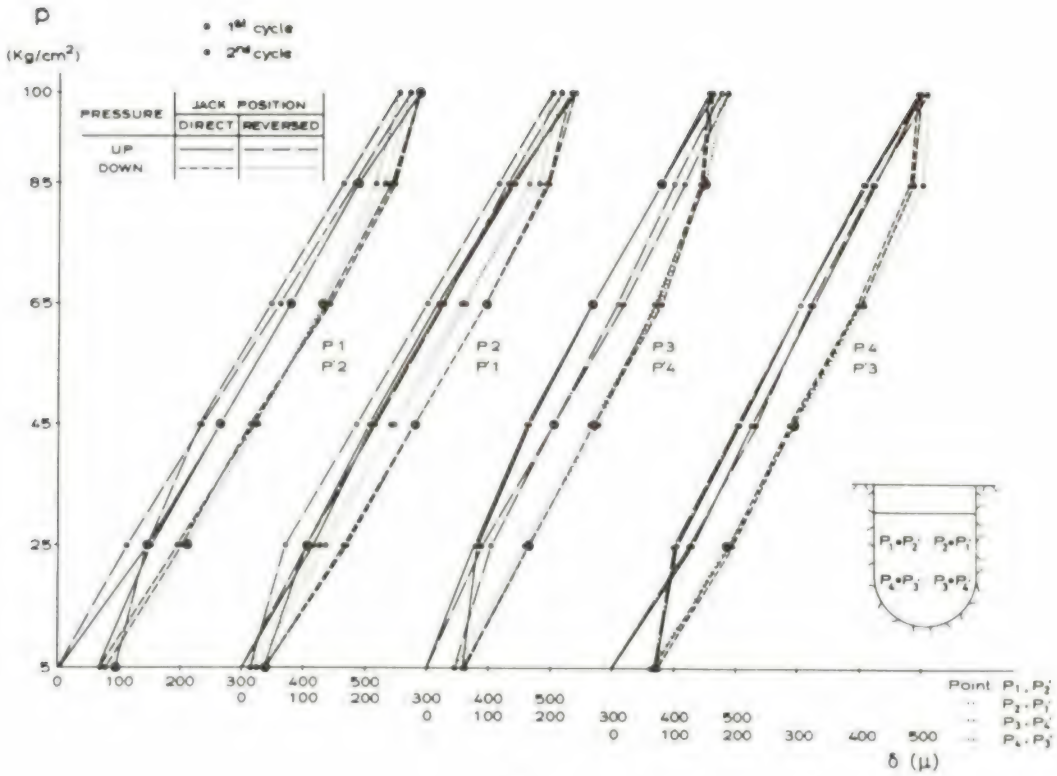


Fig. 13

In order to investigate the reproductibility of the results tests were repeated reversing the position of the flat jack. The results obtained in these tests, at the points P'_1, P'_2, P'_3 and P'_4 are also indicated in Fig. 13. The diagrams corresponding to the same points of the slot show a very good reproductibility.

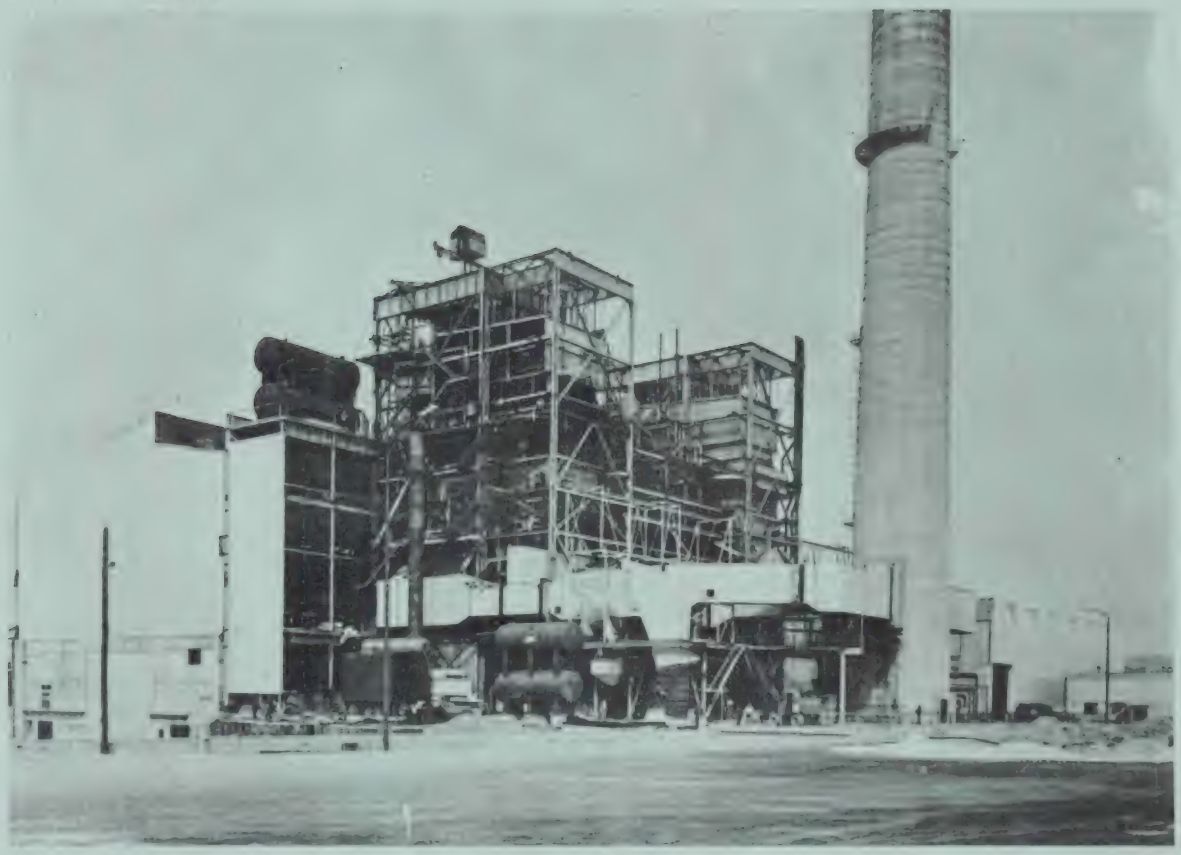
Deformability moduli were calculated by the expression presented above, for the results obtained in each of the four positions of the deformeters. The following values corresponding to the average slopes $\frac{p}{\delta}$ of the linear stretches of the four loading and unloading diagrams presented in Fig. 13, were obtained:

	c (cm)	$\frac{p}{\delta}$ (kg/cm)	E (kg/cm²)
P_1, P'_2	302	1 740	525 000
P_2, P'_1	302	1 740	525 000
P_3, P'_4	290	1 950	565 000
P_4, P'_3	290	1 950	565 000
	Mean value		545 000

As can be seen, the values corresponding to the same distance to the edge of the quarter of space are equal, while those corresponding to a greater distance are higher, as should be expected. The values of E show an excellent agreement which corfirms, on one hand, the rock homogeneity expected from visual inspection and, on the other hand, the high reliability and accuracy of the technique developed.

After cutting three new slots in the same limestone, three types of tests were performed: tests for each one of the three slots; tests for each one of the two sets of two contiguous slots; and a test for the set of the three slots. In the following table the values of deformability modulus, in 10^3 kg/cm², obtained from curves $p - \delta$, according to the criterium adopted above for the single slot test are presented; in the penultimate line are given the values corresponding to the measurements made with the deformeters placed at the smaller distance from the surface, that is, at points P_1 and P_2 of each flat jack, and on the last line those regarding points P_3 and P_4.

MAGUE



Aspecto da nova Central Térmica do Carregado (Empresa Termoeléctrica Portuguesa, S. A. R. L.), actualmente constituída por dois escalões de 125 MW, e equipadas com:

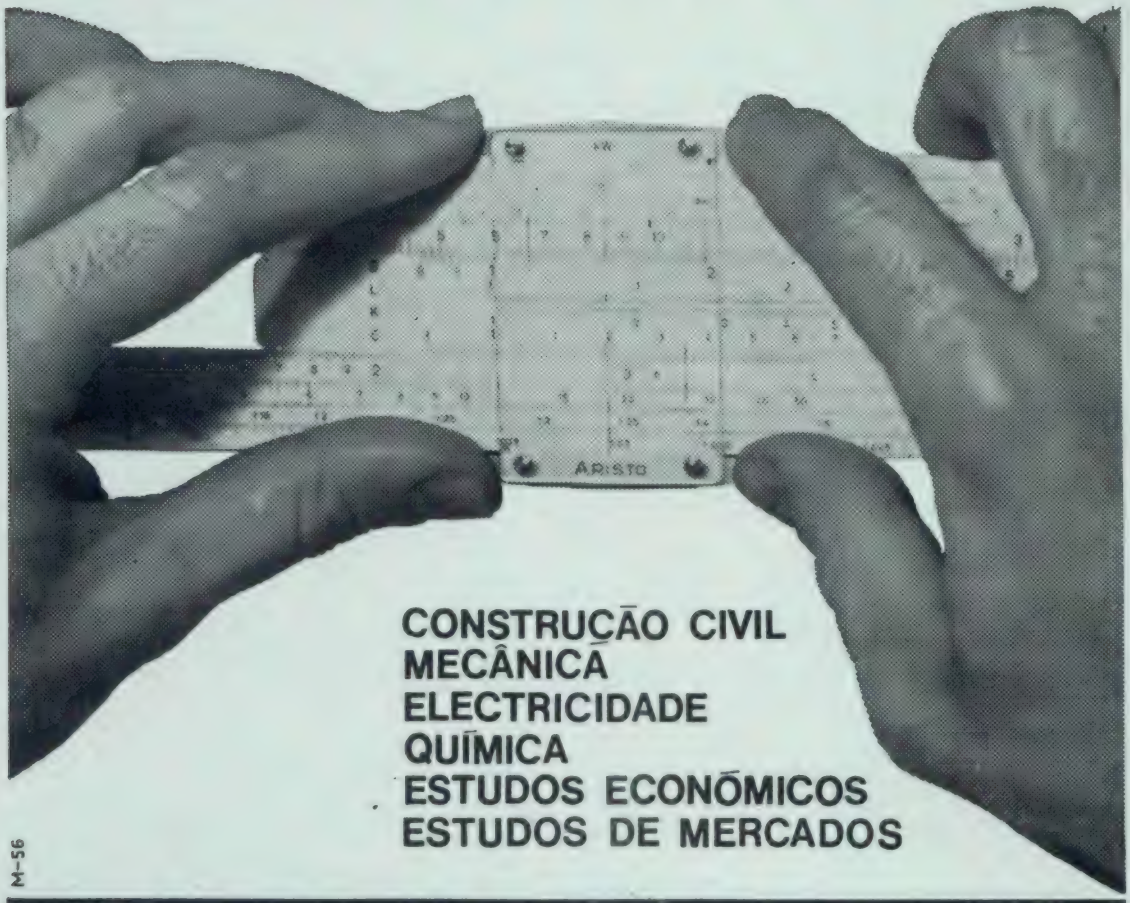
Caldeira Mague de 400 t/h de vapor sobreaquecido e resobreaquecido a 545° C, construídas em Portugal sob licença Foster Wheeler Corporation (U. S. A.), com engineering, fabrico e montagem realizados pela Mague.
Turbo-Grupos Brown-Boveri-Mague de 125 MW, construídos em grande parte pela Mague em colaboração e sob licença da Brown Boveri & Cie (Suiça).
Pórticos e Pontes Rolantes Mague, de concepção e construção Mague.

PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS	*Projecto e fabrico*
TURBINAS HIDRÁULICAS	*Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.*
TURBINAS A VAPOR	*Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.*
CALDEIRAS A VAPOR	*Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.*
EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS	

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L.

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

PROJECTOS COMPLETOS DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS



CONSTRUÇÃO CIVIL
MECÂNICA
ELECTRICIDADE
QUÍMICA
ESTUDOS ECONÓMICOS
ESTUDOS DE MERCADOS

M-56

LUSOTECNA

CONSULTORES TÉCNICOS INDUSTRIAIS, S A R L

R. PADRE A. VIEIRA, 26 - LISBOA - TEL. 688082/3

A MAIOR ORGANIZAÇÃO DO PAÍS QUE SE DEDICA EXCLUSIVAMENTE A ESTUDOS E PROJECTOS

One slot test				Two slot test			Three slot test
1	2	3	Mean value	1 + 2	2 + 3	Mean value	
830	815	965	870	840	805	822	596
1 080	915	1 130	1 040	890	815	852	612
Mean value			955			837	604

As can be seen, the values of the modulus of deformability are even greater than those referred previously. It was found that in all the tests the values of the modulus of deformability corresponding to the readings made at the deepest points are higher. This must be due to a lower compacity of the rock mass near the surface. It should be noted besides that the values decrease when one changes from the one jack tests to the tests with two jacks, and even more markedly when the test is carried out with three jacks. This fact shows well the influence of the magnitude of the volume tested on the value of the modulus of deformability, although we are dealing with a very compact rock mass.

Time spent in a test of a single slot, including the fixing of the cutting machine, the cutting of the slot, performance of tests according to the program indicated, and the removal of the jack, from the slot, is only about 10 hours. In the case of three slot tests the time needed is about three days work.

The test program to study the deformability of a rock mass depends on the problem to be solved and on the nature of the rock mass. First the total area of the slot depends on the degree of the heterogeneity and on the spacing of fracturing of the rock mass. Concerning the application of the pressure p the following procedure is advisable: to perform several loading / /unloading cycles; to measure the slot openings for successive values of the pressure; and to observe the creep of the rock mass for the maximum value of the pressure and maybe for other values. To investigate the influence of grouting, tests can be repeated in the same slots, after grouting the rock mass under conditions similar to those occuring in the structure.

As referred in art. 1 the location of the test sites should be chosen in accordance with the zonation of the rock mass which will be based on the results obtained with the dilatometer.

From what has been said it can be concluded that thin flat jacks allow the quick and economical testing of large volumes of practically undisturbed rock mass. In fact, the disturbance induced by the cut of the slots is negligible and the disturbance resulting from the preparation of the rock surface is very small at the depths with influence on the slot opening and in the direction of the pressure applied by the jacks. Note that in current jackloading tests pressures are applied in direction where decompression due to the preparation of de surface is more marked.

With this new technique the difficulty usually met with to determine the deformability of a mass, particularly in so far as foundation problems are concerned, is overcome. A paper in which the technique and its application are dealt with more fully is being prepared (Rocha and Silva, 1968).

2.3 — Correlation of results

Correlations between results obtained with the dilatometer and with flat jacks are of much interest. In fact, these correlations will allow: a better understanding of the meaning of the results supplied by the dilatometer; a reduction of the number of flat jack tests, more time consuming and expensive than dilatometer tests; and the application of the results obtained with jack tests to the zones tested only with the dilatometer.

The easiest way to obtain these correlations is to use the cutting machine itself to drill a 76 mm borehole and to perform the dilatometer tests, preferably at the depths at which deformeters of the flat jacks will be placed. Afterwards, the 17cm hole will be drilled and the slot will be made and tested, the cutting machine being always kept in the same position.

If correlation with results of laboratory tests on rock specimens is to be made, it will not be advisable to drill the 76mm holes in the position

indicated, in order to allow tests of larger specimens taken from the 17 cm drilling cores. The testing of specimens taken along the direction in which pressure is applied by the jacks is particularly relevant. The dilatometer tests can then be performed in holes drilled near the slots, for instance in the positions indicated in Fig. 14 for a three flat jack test.

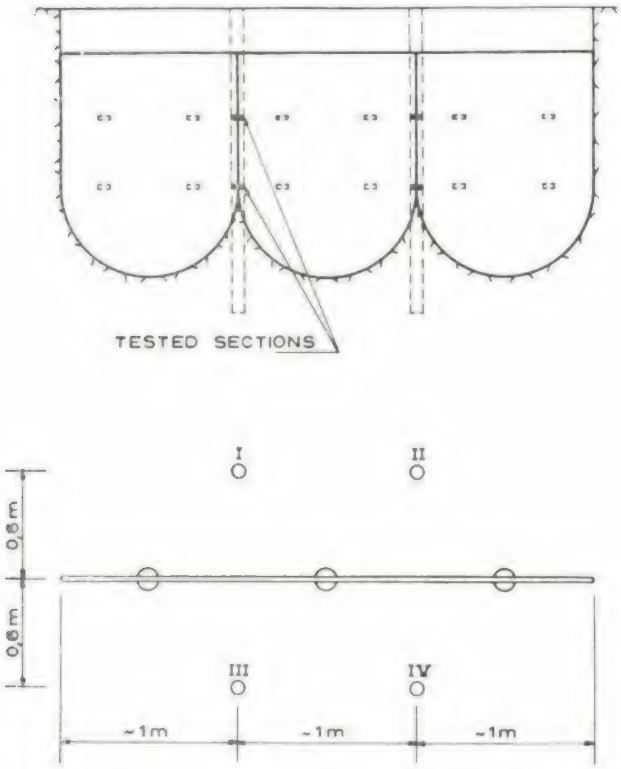


Fig. 14

We intend in future to carry out the determination of these correlations whenever tests with flat jacks are performed.

3 — DETERMINATION OF THE STATE OF STRESS IN ROCK MASSES

3.1 — Strain tensor gauge

The technique developed for complete determination of the state of stress in boreholes will be briefly described. This technique can be used at great depths, even over one hundred meters, and in waterfilled boreholes.

The technique consists essentially in (Fig. 15): i) drilling a borehole with a diameter D, till the neighbourhood of the point where the state of stress is to be determined; ii) drilling a coaxial borehole with a small diameter, $d = 3.7$ cm, and a length of about 90 cm, starting at the bottom of the previous hole; iii) cemeting on to the wall of this hole a plastic cylinder in wich electrical strain gauges are embedded, pointing at convenient directions and connected by an electric cable to the measuring apparatus on the surface of the grcund; iv) taking initial readings on every strain gauge; v) carrying on drilling the larger diameter hole to release stresses, so as to obtain a core with a diameter not less than 7.5 cm, while keeping the cable connected to the gauges; vi) taking final readings, to determine the deformations caused by stress relief; and vii) calculating the state of stress that existed at the point, based on the deformations determined.

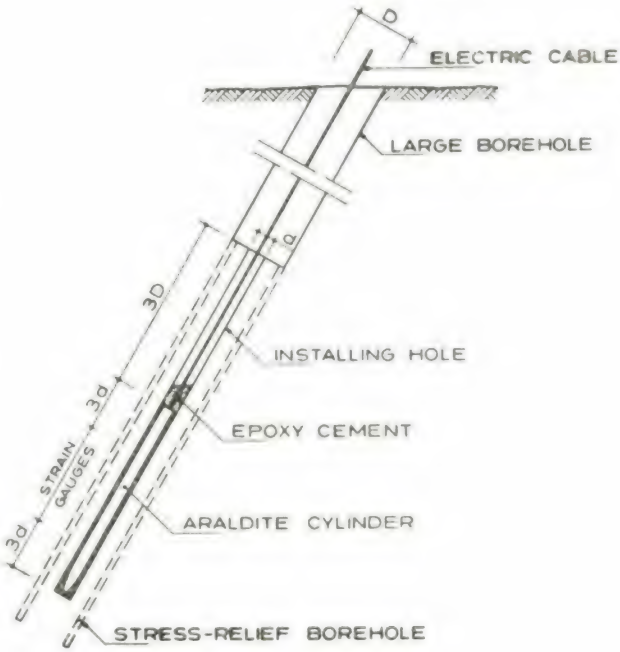


Fig. 15

If one wishes to know the evolution of the state of stress at a given point a plastic cylinder will be placed inside a $d = 3.7$ cm diameter borehole, according to the technique described above, and the evolution of the deformations measured by electric strain gauges will be followed.

Diameter d of the hole into which the plastic cylinder is placed was chosen in order to reduce

the diameter of overcoring and therefore its cost, but also taking into account the need to use in the cylinder electric strain gauges with a small rigidity. The diameter of the overcoring core should be such as to allow the assumption that deformations undergone by the plastic cylinder during stress relief are identical to those that would be observed if the core had a very large diameter. Therefore, the more deformable the rock mass the larger should be the diameter to be required for the core.

Cylinders are made of araldite and their diameter is 3.5 cm (Fig. 16). A clearance of 2 mm

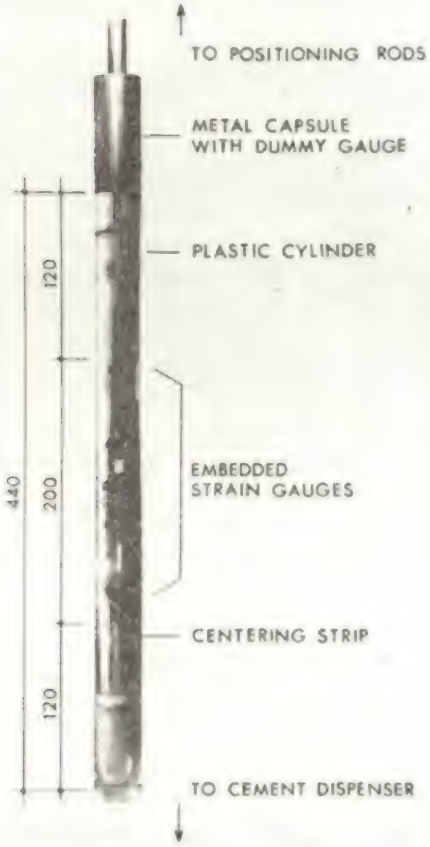


Fig. 16

is thus left between the cylinder and the borehole wall. Ten 2 cm base electric strain gauges are embedded in the central part of the cylinder, pointing at the nine directions indicated in Fig. 17. In this figure the third of the coordinate axes O_{xyz} runs along the cylinder axis and contains the two gauges numbered 2 and 8. Four superabundant gauges are thus used, allowing the measured strains to be verified or optimized. There is an extra strain gauge, embedded in a small loose prism of the same araldite, free to deform inside the metal capsule (Fig. 16). This dummy gauge provides compensation for temperature changes during testing.

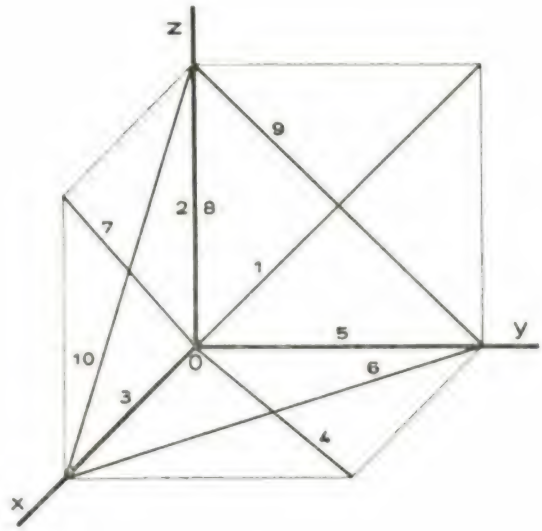


Fig. 17

The cylinders are cemented on to the rock by means of an epoxy cement which after hardening presents the same mechanical properties as the material of the cylinders. The cement is previously poured into the bottom of the installing hole or else carried in a container with very flexible walls, connected to the far end of the cylinder itself (Fig. 18). The cylinder is attached to steel positioning rods which force its way into the installing hole and make the cement extrude through the narrow gap between cylinder and borehole wall. Water and drill waste eventually remaining in the hole are pushed ahead of the extruding cement, leaving behind clean surface for the fresh cement to adhere to. The cylinder is centered in the borehole by means of plastic strips about 1 mm thick (Fig. 16), and its azimuth is defined by the positioning rods.

During overcoring, which should be done when the cement has hardened, the positioning rods are safely housed in the drill ones so that the electrical connexion is maintained during the drilling process in order to read the electrical

strain gauges. Evolution curves may thus be obtained, making it possible to detect irregularities and to choose the points to be regarded as the initial and final readings.

Fig. 18

It should be noted that after taking out the core it is possible to test the quality of the bond between cylinder and rock. Transverse and longitudinal cuts for visual inspection and even for carrying out mechanical tests, may be done to test the bond resistance. Once the strains ε_1 to ε_{10} due to stress relief and measured by the electrical strain gauges have been obtained, the adjustments of the values will be made using the following three compactibility equations:

$$\varepsilon_{2,8}+\varepsilon_3+\varepsilon_5=\varepsilon_{2,8}+\varepsilon_4+\varepsilon_6=\varepsilon_1+\varepsilon_3+\varepsilon_9=$$
$$=\varepsilon_5+\varepsilon_7+\varepsilon_{10}$$

where $\varepsilon_{2,8}$ represents the mean value of the strains measured by strain meters 2 and 8. The six components of the strain tensor are calculated using the adjusted values of the strains:

$$\begin{aligned}
\varepsilon'_x &= \varepsilon_3 \\
\varepsilon'_y &= \varepsilon_5 \\
\varepsilon'_z &= \varepsilon_{2,8} \\
\gamma'_{yz} &= \varepsilon_1-\varepsilon_9 \qquad (1) \\
\gamma'_{zx} &= \varepsilon_7-\varepsilon_{10} \\
\gamma'_{xy} &= \varepsilon_4-\varepsilon_6
\end{aligned}$$

Strains are considered positive when they correspond to shortenings.

Assuming an elastic beaviour for the rock mass and for the cylinder, the following equations were derived to calculate the six components σ_x, σ_y, σ_z, τ_{yz}, τ_{zx} and τ_{xy}, of the stress tensor:

$$\varepsilon'_x = -\left(\frac{m'M-n'N}{E'}+\frac{\nu\nu'}{E}\right)\sigma_x -$$
$$-\left(\frac{m'M-n'N}{E'}+\frac{\nu\nu'}{E}\right)\sigma_y-\frac{nM-\nu}{E}\sigma_z$$

$$\varepsilon'_y = -\left(\frac{m'M-n'N}{E'}+\frac{\nu\nu'}{E}\right)\sigma_x -$$
$$-\left(\frac{m'M+n'N}{E'}+\frac{\nu\nu'}{E}\right)\sigma_y-\frac{mM-\nu}{E}\sigma_z$$

$$\varepsilon'_z = \frac{\nu}{E}\sigma_x+\frac{\nu}{E}\sigma_y-\frac{1}{E}\sigma_z$$

$$\gamma'_{yz} = -\frac{4n}{E}\tau_{yz} \qquad (2)$$

$$\gamma'_{zx} = -\frac{4n}{E}\tau_{zx}$$

$$\gamma'_{xy} = -\frac{4n'N}{E'}\tau_{xy}$$

Being

$$n = 1+\nu \quad n' = 1+\nu' \quad m \quad \frac{\nu-\nu'}{1-}$$

$$m' = (1-2\nu')\frac{1-\nu\nu'}{1-\nu}\cdot\frac{n'}{n}$$

$$M = \frac{1-\nu}{1+(1-2\nu')\frac{E}{E'}\cdot\frac{n'}{n}}$$

$$N = \frac{2(1-\nu)}{3-4\nu+\frac{E}{E'}\cdot\frac{n'}{n}}$$

where E and ν, and E' and ν' represent, respectively, the Young's modulus and the Poissons' ratio of the rock mass and of the plastic of the

cylinder. Normal stresses are considered as positive when they are compressions and the tangential stresses when they are directed as indicated in Fig. 19 for τ_{xy} τ_{yz}.

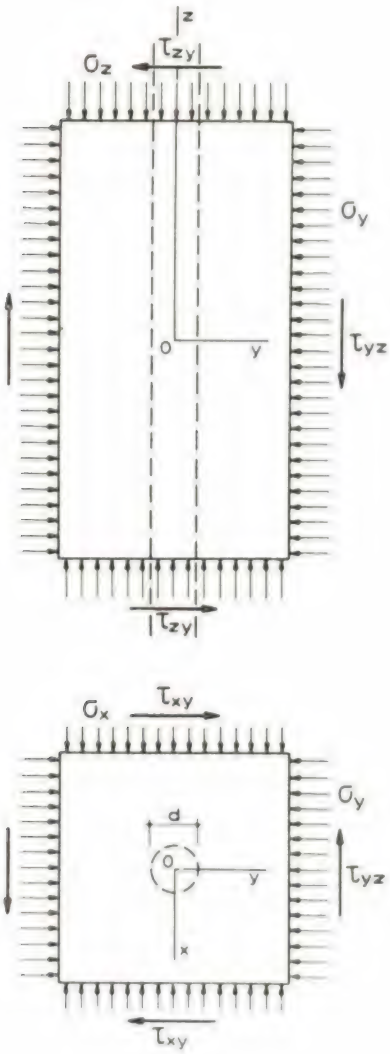


Fig. 19

Principal stresses and their directions are easily calculated by computing the eigenvalues and the eigenvectors of the simetrical matrix:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{ny} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

When the strain tensor gauge is used to determine the evolution of the stresses in a rock mass, inversion of signs in the six expressions (2) should be made.

To assess the method with regard to the determination of the initial state of stress, particularly as regards the bond between the cylinder and the rock and the validity of the equations established, tests of rock prisms were performed in laboratory simulating field conditions (Fig. 20). The prisms, made of rocks with different textures, had each a 37 mm diameter hole drilled longitudinally, transversely and at 45°. They were submitted to a constant compression under which the cylinders were bonded. After hardening of the cement, which took about two days, the prisms were unloaded by steps, at a rate intended to simulate the progress of the stress-relief overcoring during the «in situ» tests. The deformations of the sides of the prisms were also measured simultaneously with the measurements of the deformations read by the electric strain gauges embedded in the cylinder, in order to control the centering of the compression applied on the prisms and to determine the elastic properties of the rocks.

Fig. 20

For the two oolitic limestone prisms, fitted with cylinders placed transversely and at 45°, tested in the conditions indicated in Fig. 21, the components of the state of stress determined from the measured strains, by means of expressions (1) and (2), and those corresponding to the loads applied on the prisms are given in the table below, expressed in kg/cm²:

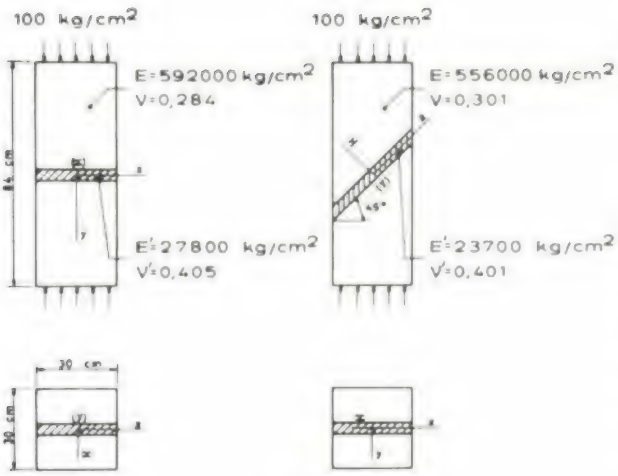


Fig. 21

Stress components	Prism with transverse cylinder		Prism with cylinder at 45°	
	Determined	Applied	Determined	Applied
σ_x	-2,2	0	50	50
σ_y	97	100	0,31	0
σ_z	0,9	0	53	50
τ_{yz}	1,8	0	0,043	0
τ_{zx}	-2,0	0	-0,021	0
τ_{yx}	1,1	0	42,4	50

As can be seen, agreement is very good since, with regard to the higher value components, errors only amount to 3% in the case of the cylinder placed transversely and 15% in the case of the cylinder placed at 45°.

In the case of the prism with the cylinder placed at 45°, the magnitudes and directions of the principal stresses, designated S_x, S_y and S_z, were also determined from the components of the state of stress determined experimentally (penultimate column of the previous table). The following results were obtained, which are compared with the state of stress applied on the prism:

Principal stresses	Magnitudes (kg/cm²)		Direction angles					
			With O_x		With O_y		With O_z	
	Determined	Applied	Determined	Applied	Determined	Applied	Determined	Applied
S_x	93,9	100	46° 2′	45°	89° 54′	90°	43° 59′	45°
S_y	0,3	0	89° 47′	90°	30′	0°	89° 46′	90°
S_z	9,1	0	43° 59′	45°	89° 42′	90°	46° 1′	44°

An excellent agreement exists for the principal directions, since they only differ by 1°. The agreement is also satisfactory as regards magnitudes.

The results of field tests performed on a vertical borehole drilled in a slightly jointed rock mass constituted by a very compact diorite are presented. The state of stress was determined at 52 m and 57 m the hole being filled with water. Using the calculation method already described, the magnitudes and directions of the principal stresses were determined from the components of the state of stress relative to the sistem of axes O_{xyz} connected to the cylinders. The values obtained are presented below, the two plastic cylinders having been mounted so that the axes of the system O_{xyz} were parallel:

Depth (m)	Principal stresses	Magnitudes (kg/cm²)	Direction angles (°)		
			With O_x	With O_y	With O_z
52	S_x	174	16	85	105
	S_y	144	90	20	70
	S_z	43	74	109	25
57	S_x	145	5	85	88
	S_y	153	95	11	80
	S_z	88	92	100	10

Therefore the state of stress does not vary considerably in either magnitude or direction, between the two points at 5 m interval, except with regard to the magnitude of one of the principal stresses. It should be pointed out that an approximately hydrostatic subhorizontal compression state of stress occurs in the site, which amounts to as much as 150 kg/cm². As to the principal subvertical stress we have no explanation for the great variation observed from one point to the other, and it should be noted that both values are much higher than the stress due to the overburden.

We would like to stress that the strain tensor gauge can be used in the determination of the evolution of the state of stress in the foundation of a structure or in the neighbourhood of an opening during excavation, which can thus be controlled.

Although our experience on the use of the strain tensor gauge is still limited, it is enough to make us have great hopes in the method developed. We think that the accuracy of results is satisfactory with regard to practical needs.

In order to obtain representative results of the average state of stress in the rock mass, measurements should be taken in points as far removed as possible from joints, fractures and other features where the field of stress may exhibit local disturbances.

The application of the strain tensor gauge method is expeditious, a working group being able to determine in one week the state of stress in about two points, the number depending on the depth of the points and on the number of holes being tested simultaneously.

A paper will shortly be published in which the method will be described more fully (Rocha and Silvério, 1968).

3.2 — Thin flat jacks

With a little extra work the thin flat jack test referred under 2.2 can be used for the simultaneous determination of the initial normal stress σ of the rock mass in the plane of the slots. It suffices to measure the distance between pairs of points such as points A and B of Fig. 7, and to determine the value of the pressure that has to be applied on the jacks to restore the initial values of the distances. We will get $\sigma = p$ as long as the distance a (Fig. 7) is sufficiently small. The measurements of the distances between pairs of points has been carried out with a 30 cm base deformeter developed at the LNEC. An initial stress of $\sigma = 10$ cm^2 was obtained for the three slot test referred in 2.2.

The determination of the state of stress near the surface of the rock mass can be made by the technique specially developed for this purpose at the LNEC (Rocha, Lopes and Silva, 1966). This technique is similar to the one just described but the slot made in the rock has the shape of a segment of circle (Fig. 22) and it is made by

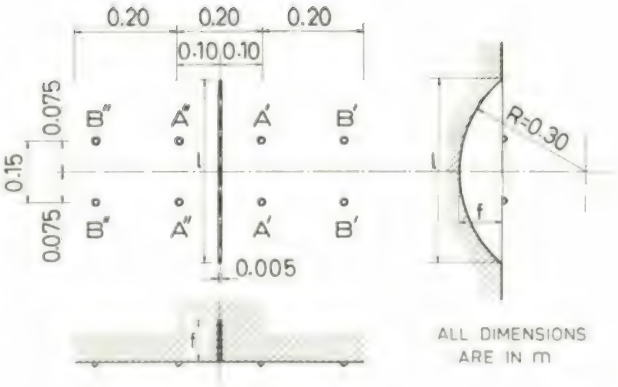


Fig. 22

the machine shown in Fig. 23 fitted with a 60 cm diameter diamond disc. The segment shaped flat jacks to be installed in the slot for restoring

Fig. 23

the initial state of stress are presented in Fig. 24. A series of flat jacks are used by means of which the initial stresses can be determined as the depth of the slot increases. Laboratory tests, in which the conditions under which the technique is applied on the site were reproduced, allowed to conclude that the values of the initial state of stress are determined within an error that does not exceed 10 %.

Compared with the usual technique of initial stress determination by means of flat jacks, the techniques referred have the advantage of reducing rock disturbance to a minimum, of not requiring the use of mortar or any other material to adjust the plane jack to the rock mass, and of allowing the easy removal of the jacks after

each test. Moreover, if the measurement of the variation of the distance between points *A* and *B* is made during the cutting of a slot and if the evolution of this distance is known, it will be possible, on one hand, to detect possible anomalous non-elastic deformations and, on the other hand, to determine the deformability modulus of the rock mass. The evolution curve of distance *AB* in function of the depth of the slot was determined by model tests, assuming the hypothesis of elasticity.

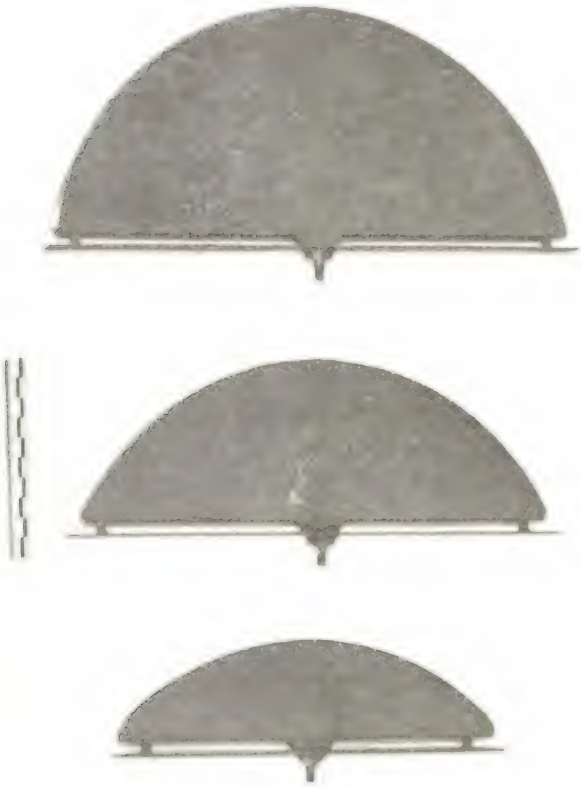


Fig 24

Contiguous slots can be cut in three or more directions, for the complete determination of the state of stress parallel to the rock mass surface. This technique, of wich some results are presented in the paper already referred to, has proved very speedy and economical.

In comparison with the strain tensor gauge method, the determination of the initial stresses near the surface by means of thin flat jacks presents the advantage of involving a much larger volume of the rock mass and thus leading to more representative values. This aspect is specially relevant owing to the fact that the field of stresses near the surface of rock masses generally exhibits a more marked variability from point to point. We noticed that the field of stresses can vary quickly with the distance to the surface. This may make it advisable to adopt segment flat jacks in spite of the flat jacks referred in the first place being larger.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author wishes to tender his grateful acknowledgement for the valuable support received particularly from Mr. Eduardo Tavares Cardoso, Mr. Emílio de Oliveira and Mr. Jorge Neves da Silva, Research Engineers, and from Dr. Arnaldo Silvério.

REFERENCES

ROCHA, M.: (1966) Rock mechanics in Portugal. *Proc. First Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon*, vol. 3, p. 121-132.

ROCHA, M., SILVEIRA, A., GROSSMANN, N., and OLIVEIRA, E.: (1966) Determination of the deformability of rock masses along boreholes. *Proc. First Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon*, vol 1, p. 697-704.

ROCHA, M., LOPES, J. B., and SILVA, J. N.: (1966) A new technique for applying the method of the flat jack in the determination of stresses inside rock masses. *Proc. First Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon*, vol. 2, p. 57-65.

ROCHA, M., and SILVA, J. N.: (1968) A new method for the determination of the deformability of rock masses and their initial state of stress. To be published in *Water Power*, London.

ROCHA, M., and SILVÉRIO, A.: (1968) A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses. To be published in *Geotechnique*, London.

dist. Belarte

... mas é um dos grandes da nossa série de fabrico de motores trifásicos

AEG

Era impossivel ser o maior, pois é V. que determina a sua grandeza. Nós dimensionamos o motor conforme as necessidades. Poderá ser um motor de 3000 kW, 5000 kW ou mais. Ao comprar-se um motor AEG, não se adquire sòmente o motor em si, como tambem uma experiência comprovada ao longo de largos anos. Tipo de protecção: P23 W. Os nossos motores são à prova de intempéries, com refrigeração interna. Esta protecção é conseguida à custa da forma da sua carcaça, a qual protege todas as peças activas do motor contra os efeitos prejudiciais da entrada de água e de corpos estranhos, através dum isolamento dos enrolamentos, insensivel à acção da humidade, por pintura à prova de intemperies e dum filtro de ar incorporado.

A AEG projecta e fornece motores de accionamentos trifásicos destinados a qualquer ramo de industria e a qualquer solicitação, como p. ex., rápida interpermutabilidade, ligação directa, arranque dificil, comutação da rede, bem como recuperação da velocidade nominal de rotação em carga, a quando de quedas de tensão.

Os nossos engenheiros estão ao v/ inteiro dispor para eventuais esclarecimentos.

AEG-LUSITANA DE ELECTRICIDADE

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS

SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEF.: 52091 PBX
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

FELTROS, FILTROS E TECIDOS INDUSTRIAIS PARA TODOS OS FINS:

EM PEÇAS, PANOS, MANGAS OU SACOS,
DE QUALQUER FIBRA

PASTA PARA PAPEL
PAPEL
FIBROCIMENTO
CURTUMES
FIAÇÕES DE ALGODÃO
LINHAS
INDÚSTRIAS QUÍMICAS

TECELAGENS
ACABAMENTOS
TINTURARIAS
LAVANDARIAS
ESTAMPARIAS
FILTROS
DESPOEIRAGEM

Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português

DELEGAÇÃO - LISBOA
R.S.Pedro de Alcântara, 1
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
Rua Serpa Pinto, 60
C.P.2178 - Tel.4226

MOÇAMBIQUE
L.Marques - C.P.982 - Tel.741121
Beira - C.P. 1002 - Tel. 71497

C. D. U. 621.224.12

RESULTADOS DE ENSAIOS EFECTUADOS NO LABORATÓRIO DE HIDROMECÂNICA DO I.S.T. COM UMA TURBINA PELTON

por JOSÉ REBELLO DA SILVA
Engº. Mecânico
Assistente do I.S.T.

RESUMO

O autor descreve o circuito de ensaio de alta pressão do Laboratório de Hidromecânica do I.S.T., apresenta uma compilação de resultados de ensaios de rendimento efectuados na respectiva turbina Pelton e estabelece a zona de validade dos valores obtidos.

SYNOPSIS

The author describes the high pressure essay circuit of the Hidromecanics Laboratory of I.S.T., presents a sum of yield essay results, made in the respective Pelton turbine and establishes the validity gap of obtained values.

A entrada em funcionamento do Laboratório de Hidromecânica do I.S.T. permitiu, já no passado ano lectivo, que se efectuasse uma série de ensaios englobados no programa das Cadeiras de Turbomáquinas. Os alunos puderam assim observar experimentalmente o comportamento dos diversos tipos de máquinas, turbinas e turbobombas, em funcionamento.

Parece interessante apresentar uma compilação dos resultados então obtidos nas aulas práticas da Cadeira de Turbomáquinas II Parte, completados com novos ensaios que efectuámos, não só para comprovar a validade daqueles, como ainda para cobrir zonas que as limitações do tempo de aulas não permitiu abranger no programa do ano lectivo passado naquela Cadeira.

A apresentação destes elementos tem como objectivo fundamental permitir a avaliação das possibilidades existentes no Laboratório. Convém desde já referir que as dimensões dos circuitos de ensaio foram previstas para permitir, em primeiro lugar, alcançar os objectivos pedagógicos, com aplicação à formação dos alunos, particularmente nas Cadeiras de Turbomáquinas. Com naturais limitações pode, porém, prever-se também a aplicação à investigação — com possibilidade de realização de ensaios sistemáticos em modelos de características variadas — e à indústria — tanto sob o aspecto de inspecção, para comprovação de características de funcionamento, como no que diz respeito ao projecto, para estabelecimento dessas características.

Vamos começar pelo circuito de alta pressão, com uma turbina Pelton de ensaio. Em próximas publicações apresentaremos os resultados relativos ao circuito de baixa pressão, com uma turbina Francis e com uma turbina Kaplan de ensaio, e ao banco de ensaios de turbobombas.

1 — DESCRIÇÃO DO CIRCUITO

Na figura 1 representa-se o circuito em corte longitudinal e planta e na figura 2 apresenta-se uma perspectiva do conjunto.

Fig. 2

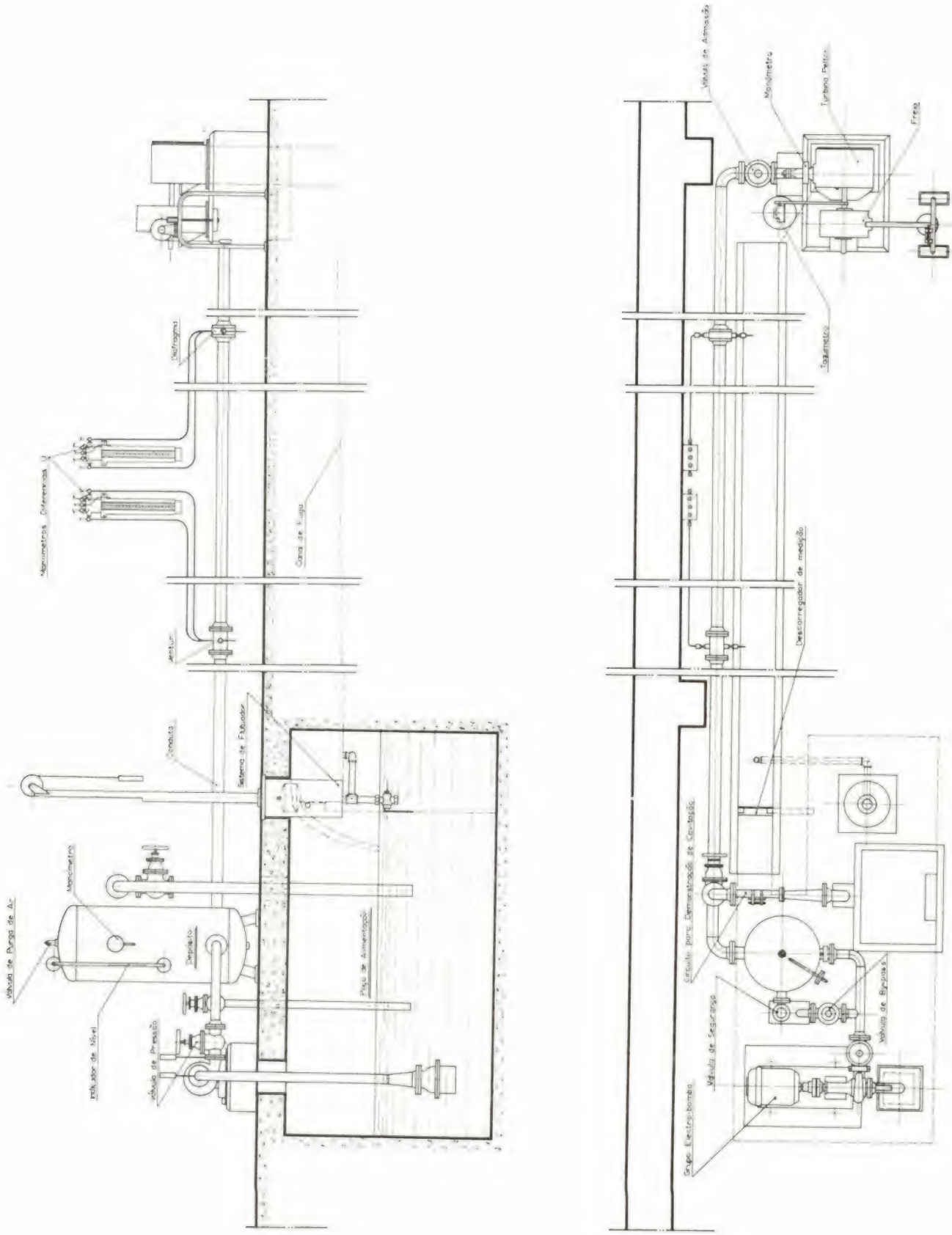

Válvula de Armação
Manómetro
Turbina Pelton
Freio
Tacómetro
Diafragma
Manómetros Diferenciais
Cana de Fuga
Venturi
Descarregador de medição
Conduta
Sistema de Fluidificador
Manómetro
Válvula de Purga de Ar
Depósito
Fluidificador de Nível
Válvula de Pressão
Poço de Alimentação
Circuito para Demonstração de Cavitação
Válvula de Sequranga
Válvula de Bypass
Grupo Electrobomba

Fig. 1

Trata se de um circuito fechado em que a água, acumulada no poço de alimentação, é posta em circulação por um grupo electro-bomba horizontal com as características indicadas na figura 3. A regulação do caudal é efectuada através da válvula montada na boca de pressão da bomba.

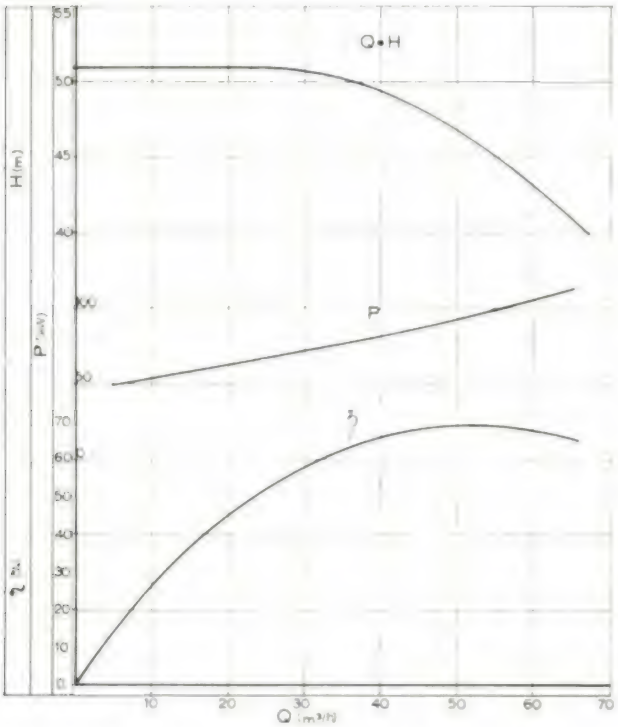


Fig. 3

A água bombada do poço de alimentação é lançada no depósito de pressão, que funciona como acumulador de pressão e ao mesmo tempo como depósito de equilíbrio, permitindo manter aquela constante. A água em excesso retorna ao poço de alimentação através da válvula de segurança automática, cujo valor de disparo pode ser regulado dentro da zona de pressões que interessa ao circuito. Um manómetro fornece a indicação do valor da pressão no depósito e um indicador de nível permite observar o nível da água nele. Na parte superior do depósito está instalada uma válvula de purga de ar.

A água é conduzida do depósito de pressão para a Pelton através de uma conduta de 80 mm de diâmetro. Na conduta estão instalados um Venturi e um Diafragma, com os respectivos manómetros diferenciais U.

A turbina é de um injector, de veio horizontal, e dispõe na sua carcaça de uma parede de plexiglas, para observação do jacto de água e sua acção sobre as pás da roda (figura 4). As suas características nominais são as seguintes:

Q — 10,4 l/s.
H — 46 m C. A.
n — 1130 r.p.m.
P — ca. 3,7 kW.
D_p — 240 mm.
n_q — 6,5 r.p.m.

A regulação do caudal é efectuada por ajustamento manual da agulha do injector, feito através de um volante.

À entrada do injector está instalado um manómetro, para indicação do valor da altura de energia potencial. O valor da velocidade de rotação é indicado num taquímetro, accionado por correia a partir do veio da turbina.

No veio da turbina está instalado um freio do tipo Prony, cuja carga pode ser variada manualmente através de um volante.

O circuito é fechado com o canal de fuga, — com 0,30 m de largura e profundidade que varia linearmente desde 0,60 m no poço da turbina até 0,70 m à entrada do poço de alimentação — através do qual a água regressa ao poço de alimentação. Junto a este está instalado um descarregador de medição de caudal, sendo a altura de lâmina de água, indicada numa escala associada a um

Fig. 4

flutuador, que funciona num poço alimentado por uma tomada no canal de fuga a cerca de 0,5 m do descarregador.

Imediatamente à saída do depósito acumulador está instalada uma derivação com um modelo

para demonstração de cavitação (figura 5). Este modelo é constituído por uma pá de perfil aerodinâmico, disposta entre duas superfícies planas e paralelas, das quais a frontal em plexiglas, para permitir observar a evolução do fenómeno, e a

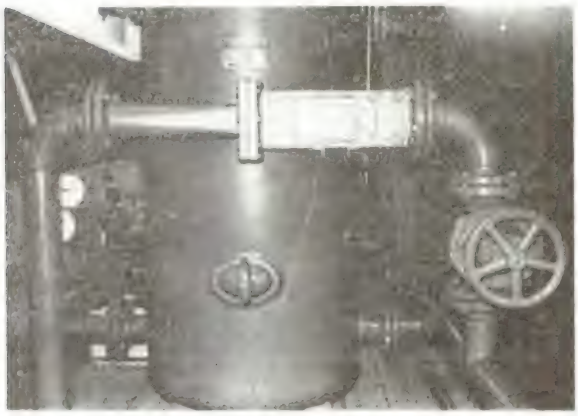


Fig. 5

posterior dispondo de um sistema de comando manual, através do qual é possível fazer variar a orientação da pá em relação à direcção do escoamento.

2 — MÉTODO DE ENSAIO

Realizaram-se ensaios de rendimento, para traçado posterior da colina de rendimento da turbina.

Para isso tomaram-se sucessivas posições de abertura do injector da turbina e para cada uma delas fez-se variar a carga no freio, de forma a poder assegurar o registo das condições de funcionamento numa zona larga de velocidades (procurou-se ensaiar desde uma velocidade elevada, próxima da velocidade de embalamento, até uma velocidade baixa, sensìvelmente inferior à velocidade nominal do modelo).

Adoptou-se a representação clássica em valores unitários, isto é, valores referidos a uma turbina geomètricamente semelhante à máquina ensaiada mas de diâmetro unitário $D'_p = 1$ m, e funcionando sob uma altura de energia unitária, $H_1 = 1$ m. Na passagem dos resultados obtidos com o modelo ensaio para valores unitários não se considerou, como também é habitual, a influência do «ganho em rendimento» devido às maiores dimensões da turbina unitária (*); esta passagem fez-se então directamente, considerando os resultados obtidos como aplicáveis á turbina unitária.

Para cada ponto de ensaio efectuou-se a leitura das seguintes grandezas, necessárias à determinação posterior das grandezas características da máquina:

- Pressão no manómetro à entrada da turbina (p_M).
- Diferença do nível do mercúrio no manómetro diferencial do Venturi (h_V).
- Idem no manómetro diferencial do Diafragma (h_D).
- Altura de lamina de água no descarregador (h).
- Carga no prato do freio (G).
- Velocidade no taquímetro (n).

Nas turbinas Pelton, turbinas de acção, para valores constantes da altura de energia estática, o caudal é determinado exclusivamente pela secção de passagem no injector, pois não existe qualquer «reacção» a uma variação das condições de funcionamento. Assim, as quatro primeiras das grandezas acima indicadas são constantes para cada posição de abertura da agulha do injector.

Registaram-se então, para cada valor $\bar{a}_0$ de abertura relativa da agulha do injector (referida à abertura total), os correspondentes valores de G e n. Com estes valores puderam calcular-se as grandezas características da máquina, correspondentes às respectivas condições de funcionamento:

- Caudal (Q).
- Altura de energia (H).
- Rotação unitária (n'_1).
- Caudal unitário (Q'_1).
- Potência (P).
- Rendimento (η).

Traçaram-se depois os sucessivos diagramas η, n'_1 e a partir destes, obtiveram-se os pontos que permitiram o traçado do diagrama em colina.

(*) Definimos como turbina unitária precisamente a máquina a que correspondem os valores unitários, isto é, uma turbina geomètricamente semelhante de diâmetro característico igual a 1 m, funcionamento sob uma altura de energia também igual a 1 m.

3 — EXECUÇÃO DOS ENSAIOS E RESULTADOS

Durante as aulas no ano lectivo de 1967/68 determinaram-se cerca de 450 pontos de funcionamento. Nos ensaios posteriores obtivemos mais cerca de 350 pontos.

No quadro 1 estão assinalados alguns dos dados obtidos nos ensaios para a posição de abertura total do injector ($\bar{a}_0 = 1{,}0$).

QUADRO 1

$\bar{a}_0 = 1{,}0$.
$p_M = 3{,}92$ kp/cm²
$h_V = 206$ mm Hg
$h_D = 200$ mm Hg
$h = 71$ mm

Ensaio	G (kp)	n (r. p. m.)
22	1,1	1605
23	1,4	1565
24	1,65	1530
25	1,95	1490
26	2,2	1455
27	2,45	1420
28	2,7	1375
29	2,95	1335
30	3,2	1295
31	3,4	1255
32	3,55	1220
33	3,7	1190
34	3,85	1160
35	3,95	1140
36	4,05	1115
37	4,15	1095
38	4,3	1070
39	4,45	1035
40	4,6	985
41	4,75	940
42	4,9	895
43	5,0	860
44	5,1	835
45	5,2	805
46	5,3	780
47	5,4	755
48	5,5	725
49	5,6	695
50	5,7	660
51	5,8	625
52	5,9	590
53	6,0	555
54	6,1	530
55	6,2	495
56	6,3	455

Quadros semelhantes foram estabelecidos com outras aberturas do injector, desde $\bar{a}_0 = 0{,}0625$ até $\bar{a}_0 = 1{,}0$, com escalonamentos de 0,03125.

A partir destes dados calcularam-se as grandezas características. No quadro 2 indicam-se os valores destas, correspondentes aos dados assinalados no quadro 1, isto é, para a abertura total do injector.

QUADRO 2

$Q = 11{,}01$ 1/s
$\frac{C_e^2}{2g} = 0{,}88$ m C.A.
$H = 40{,}08$ m C.A.
$Q_1' = 30{,}18$ 1/s.

Ensaio	n_1' (r. p. m.)	P (kW)	η (%)
22	60,9	1,30	29,9
23	59,3	1,61	37,1
24	58,0	1,86	42,7
25	56,5	2,14	49,2
26	55,2	2,35	54,2
27	53,8	2,56	58,9
28	52,1	2,73	62,8
29	50,6	2,90	66,7
30	49,1	3,05	70,1
31	47,6	3,14	72,2
32	46,3	3,19	73,3
33	45,1	3,24	74,5
34	44,0	3,31	75,6
35	43,2	3,28	76,2
36	42,3	3,31	76,4
37	41,5	3,34	76,9
38	40,6	3,38	77,9
39	39,2	3,39	78,0
40	37,3	3,33	76,7
41	35,6	3,28	75,6
42	33,9	3,23	74,2
43	32,6	3,16	72,8
44	31,7	3,13	72,1
45	30,5	3,08	70,9
46	29,6	3,04	70,0
47	28,6	3,00	69,0
48	27,5	2,93	67,5
49	26,3	2,86	65,9
50	25,0	2,77	63,7
51	23,7	2,67	61,4
52	22,4	2,56	58,9
53	21,0	2,45	56,4
54	20,1	2,38	54,7
55	18,8	2,26	52,0
56	17,3	2,11	48,5

O valor do caudal obteve-se por leitura directa (ou por interpolação) em tabelas pré-estabelecidas, com a correspondência Q, h_V ou Q, h_D ou Q, h. Para o traçado das curvas características que se apresentam, consideram-se, porém, para valores do caudal, apenas os que se obtiveram a partir dos dados do Venturi; em próxima publicação teremos oportunidade de estabelecer comparação entre os vários métodos de medição do caudal.

A altura de energia H (m C.A.) determinou-se pela expressão

$$H = 10\, p_M + \frac{C_e^2}{2g} + z_M \qquad \text{(m C.A.)}$$

em que

C_e — velocidade do escoamento à entrada do injector, na secção da tomada do manómetro de pressão (secção de medição).

z_M — cota do manómetro de pressão em relação ao eixo da secção de medição (no caso presente igual a 0,20 m).

A determinação de $\frac{C_e^2}{2g}$ fez-se directamente, a partir do caudal prèviamente determinado, pela expressão

$$\frac{C_e^2}{2g} = 7{,}25.10^{-3}\,.\,Q^2 \qquad \text{(m C.A.)}$$

em que Q entra em l/s e o coeficiente foi estabelecido tendo em conta as dimensões da secção de medição.

Os valores unitários da rotação e do caudal são dados respectivamente por

$$n_1' = \frac{nD}{\sqrt{H}} \qquad \text{(r.p.m.)}$$

$$Q_1' = \frac{Q}{D^2\sqrt{H}} \qquad \text{(l/s)}$$

tendo em atenção que D = 0,24 m.

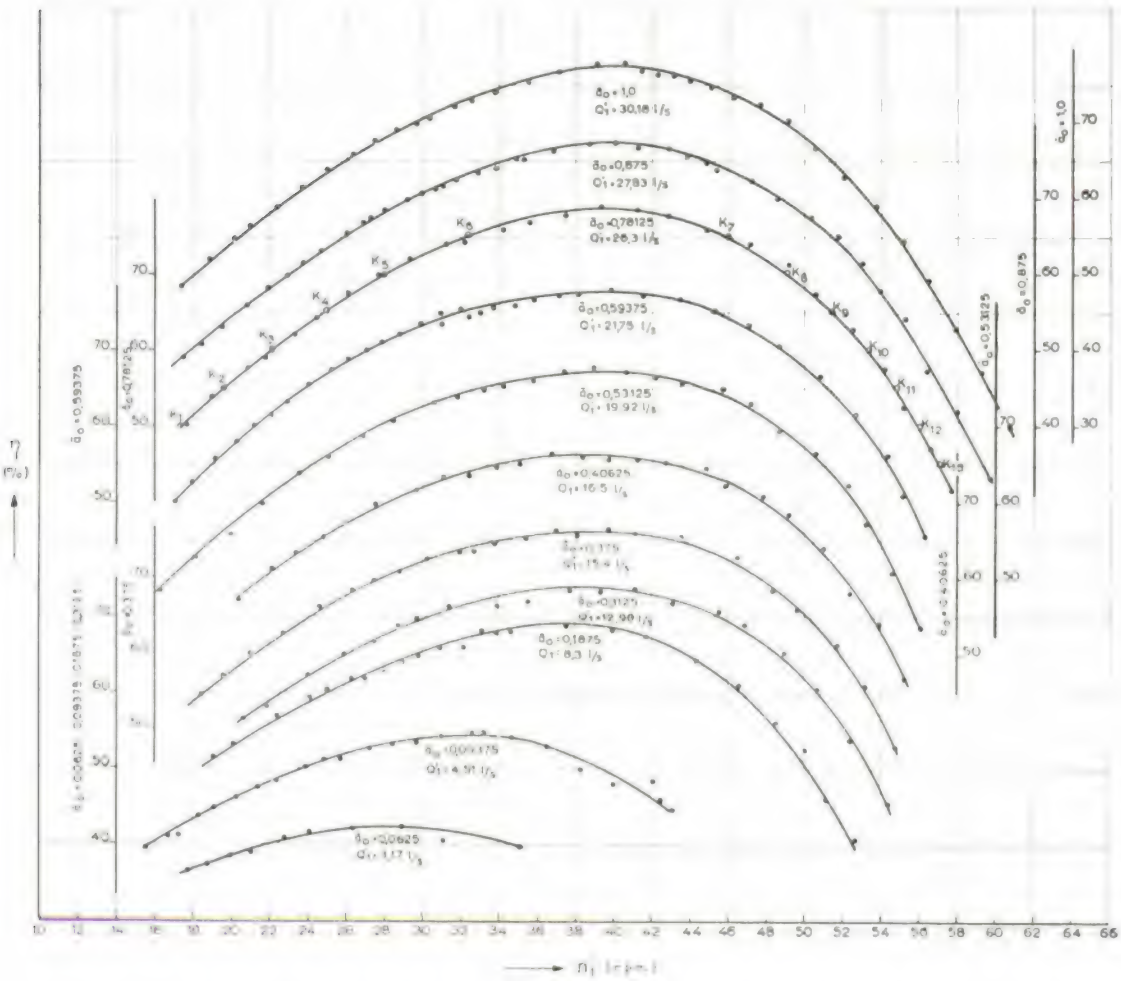


Fig. 6

A potência produzida ao veio da turbina calculou-se a partir da fórmula

$$P = 0{,}73536.10^{-3}.G.n \qquad (kW)$$

que se obtém tendo em conta que o braço do prato do freio tem um comprimento $l = 0{,}716$ m.

O rendimento calculou-se pela fórmula

$$\eta = \frac{102.P}{\gamma.Q.H} \qquad (\%)$$

em que γ é o peso específico da água e as unidades de Q, H, e P são respectivamente m^3/s, m C.A. e kW.

Na figura 6 apresentam-se algumas das curvas η, n'_1, traçadas com os dados fornecidos pelos

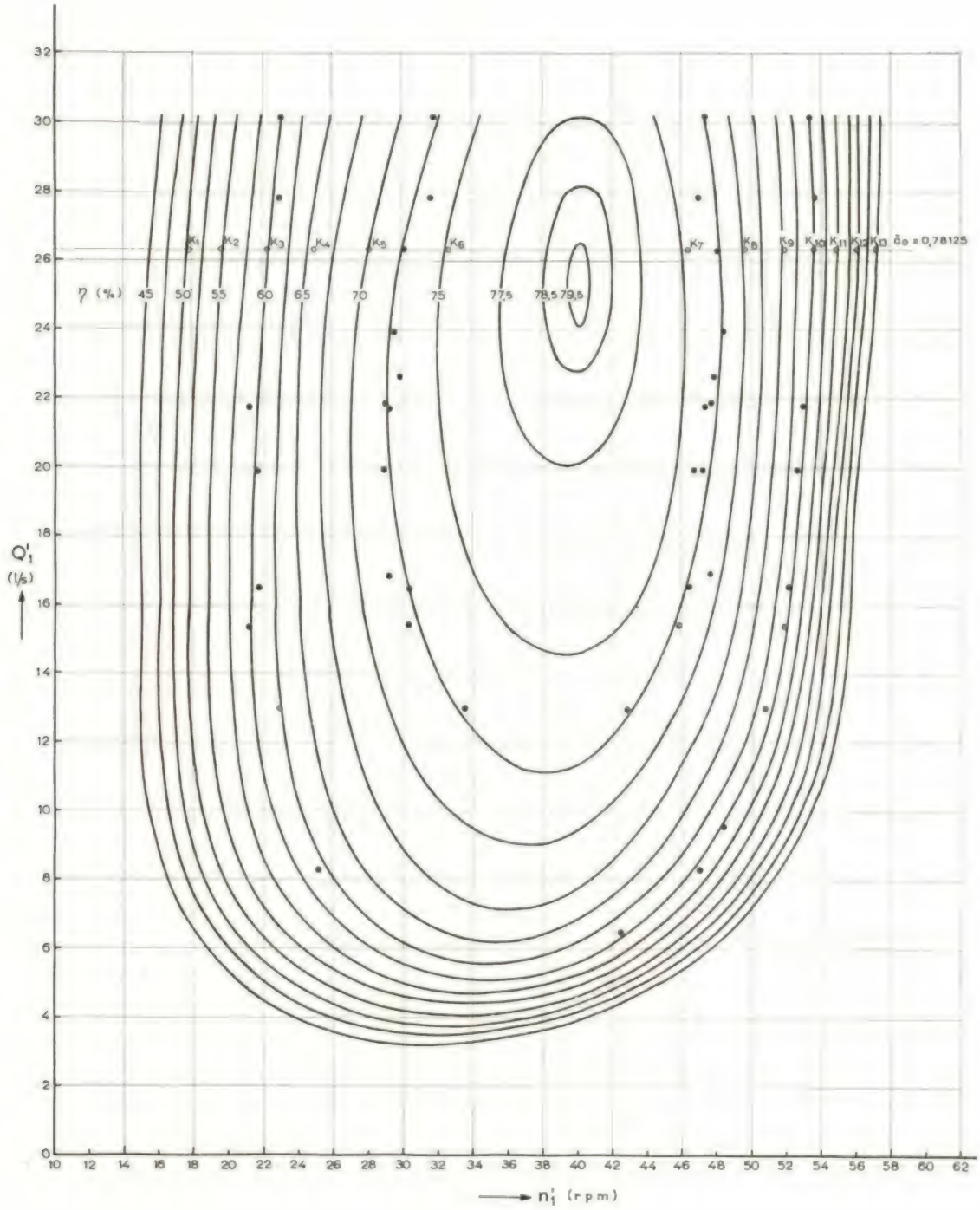


Fig. 7

quadros de resultados do tipo do quadro 2. Para as curvas traçadas assinalam-se os pontos calculados, de que elas constituem o lugar geométrico.

A partir das curvas η, n_1' determinaram-se pontos a que correspondessem rendimentos escalonados de 2,5 % em 2,5 %, a partir de dezenas exactas, e marcaram-se no diagrama Q_1', n_1' sobre o respectivo valor de Q_1'. Unindo os pontos de igual rendimento obtiveram-se as curvas representadas na figura 7.

Assinalam-se nesta figura alguns dos pontos que permitiram o traçado das curvas de $\eta = 60\,\%$ e $\eta = 72{,}5\,\%$.

Assinalam-se nela também alguns dos pontos relativos à abertura de $\bar{a}_0 \simeq 0{,}78$ ($Q_1' = 26{,}3$ l/s), em correspondência com os pontos respectivos na figura 6.

As curvas de igual rendimento apresentam, como se vê, uma forma acentuadamente alongada na direcção dos Q_1' Q_1', o que é característico das turbinas Pelton. Isto significa que, para valores constantes de n e H, ou, o que é o mesmo, de n_1', as variações de rendimento são pequenas para uma variação de caudal entre limites largos, ao passo que as mesmas se tornam importantes para variações da altura de energia, ou, o que é o mesmo, de n_1', para valores constantes de n e Q. Concretizando, pode então afirmar-se que nas turbinas Pelton o rendimento é pouco afectado por variações de caudal entre limites largos mas é acentuadamente influenciado por variações, mesmo pequenas, da altura de energia.

Esta circunstância explica-se pelo facto de a velocidade do jacto à saída do injector ser dada por $C_0 = \varphi \sqrt{2gH}$, sendo φ muito próximo da unidade e pràticamente constante, excepto para caudais muito reduzidos. Sendo C_0 pràticamente constante, para o mesmo valor de H, os triângulos de velocidade mantêm-se muito aproximadamente os mesmos e o rendimento é pouco afectado pelas variaçõos de secção do jacto, isto é, pelas variações do caudal. O mesmo não acontece para valores variáveis de H, que implicam imediatamente valores variáveis de C_0.

Na figura 8 representa-se a curva η (Q) correspondente aos valores nominais n = 1130 r.p.m e H = 46 m C.A., isto é, a $n_1' = 40$ r.p.m., obtida a partir da figura 7 pela intersecção por um plano normal ao plano do diagrama e contendo a recta de $n_1' = 40$ r.p.m. Ao valor do caudal nominal, Q = 10,4 l/s, corresponde o rendimento $\eta = 79{,}5\,\%$ e, portanto, a potência P = 3,73 kw, valor este que é bastante próximo do valor nominal indicado.

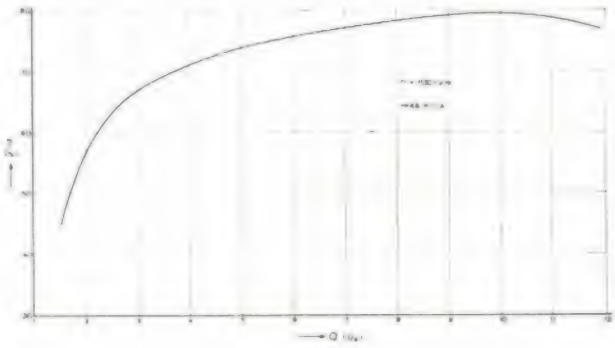


Fig. 8

4 — VALIDADE DOS RESULTADOS

Interessa avaliar até que ponto se podem considerar válidos os resultados que se obtiveram.

Para isso é necessário estabelecer expressões que permitam determinar os erros de cada uma das grandezas calculadas. Estas expressões estabelecem-se considerando diferenças finitas e entrando nelas com o valor dos erros de leitura das grandezas medidas.

Os erros de leitura são da ordem seguinte (em valores absolutos):

p_M — $\Delta p_M = \pm 0{,}01$ kg/cm²
h_V — $\Delta h_V = \pm 1$ mm
h_D — $\Delta h_D = \pm 1$ mm
h — $\Delta h = \pm 0{,}2$ mm
G — $\Delta G = \pm 5$ gr.
n — $\Delta n = \pm 5$ rpm

A z_M atribuiu-se o valor $z_M = 0{,}20$ m, ao qual corresponde um erro $\Delta z_M = \pm 5$ mm.

No quadro 3 indicam-se as expressões a que se chegou para a determinação dos erros das várias grandezas calculadas. Nota-se que no seu estabelecimento se desprezaram os erros de cálculo das constantes características, já que a sua influência pouco se faz sentir nos resultados finais.

QUADRO 3

Grandeza	Expressão	Erro
Caudal	$Q = K.\sqrt{h_V}$	$\Delta Q = \pm Q.K.\frac{1}{\sqrt{h_v}}$ com $K = 0{,}767$
Energia cinética	$\frac{C_e^2}{2g} = K_1.Q^2$	$\Delta\left(\frac{C_e^2}{2g}\right) = \pm\frac{C_e^2}{2g}.K'_1.\frac{1}{h_v}$ com $K'_1 = K.K_1 = 0{,}004265$
Altura de energia	$H = 10p_M + \frac{C_e^2}{2g} + z_M$	$\Delta H = \pm H.\left[\frac{1}{10.p_M} + K'_1.\frac{1}{h_v} + \frac{1}{40}\right]$
Rotação unitária	$n'_1 = K_2.\frac{n}{\sqrt{H}}$	$\Delta n'_1 = \pm n'_1.K_2.\left[\frac{5}{n} + \sqrt{\frac{1}{10p_M} + K'_1.\frac{1}{h_v} + \frac{1}{40}}\right]$ com $K_2 = 0{,}24$
Caudal unitário	$Q'_1 = K_3.\frac{Q}{\sqrt{H}}$	$\Delta Q'_1 = \pm Q'_1.K_3.\left[K.\frac{1}{\sqrt{h_v}} + \sqrt{\frac{1}{10p_M} + K'_1.\frac{1}{h_v} + \frac{1}{40}}\right]$ com $K_3 = 17{,}361$
Potência	$P = K_4.G.n$	$\Delta P = \pm P.K'_4.\left(\frac{1}{G} + \frac{1}{n}\right)$ com $K'_4 = 5.K_4 = 0{,}003677$
Rendimento	$\eta = K_5\frac{P}{QH}$	$\Delta\eta = \pm\eta.K_5.\left[K'_4.\left(\frac{1}{G} + \frac{1}{n}\right) + K.\frac{1}{\sqrt{h_v}} + \frac{1}{10p_M} + K'_1.\frac{1}{h_v} + \frac{1}{40}\right]$ com $K_5 = 0{,}102$

Aplicando a diversos pontos obtiveram-se, para o rendimento, erros de que se indicam alguns valores no quadro 4.

QUADRO 4

$\bar{a}_o$	Ensaio	$\Delta\eta$	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ (%)
1,0	24	± 0,463	± 1,08
	39	± 0,834	± 1,07
	49	± 0,704	± 1,07
0,78125	16	± 0,591	± 1,13
	25	± 0,880	± 1,12
	32	± 0,777	± 1,11
0,59375	14	± 0,619	± 1,22
	24	± 0,944	± 1,21
	39	± 0,830	± 1,21
0,40625	15	± 0,762	± 1,41
	23	± 1,060	± 1,40
	34	± 0,915	± 1,40
0,1875	17	± 1,037	± 2,26
	24	± 1,534	± 2,23
	40	± 1,315	± 2,22
0,0625	8	± 2,024	± 5,08
	13	± 2,118	± 5,05
	17	± 1,926	± 5,04

Na figura 9 está representada a curva de erro relativo em função da abertura do injector, definindo a correspondente zona de tolerância dos resultados.

Como se verifica, com as aproximações feitas, a validade dos resultados situa-se numa zona de

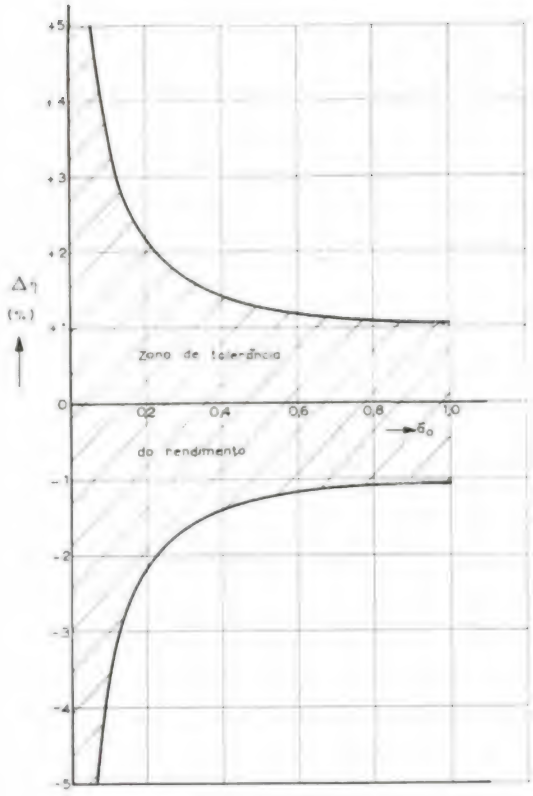


Fig. 9

tolerância que, para aberturas não inferiores a cerca de 25 % da abertura total, está limitada por um valor máximo de ± 2 %, o que nos parece bastante interessante para as dimensões do equipamento de ensaio. Apenas para aberturas inferiores a cerca de 25 % da abertura total, é que a zona de tolerância se alarga acentuadamente até atingir, nas aberturas mais reduzidas, valores limites da ordem de ± 5 %.

BIBLIOGRAFIA

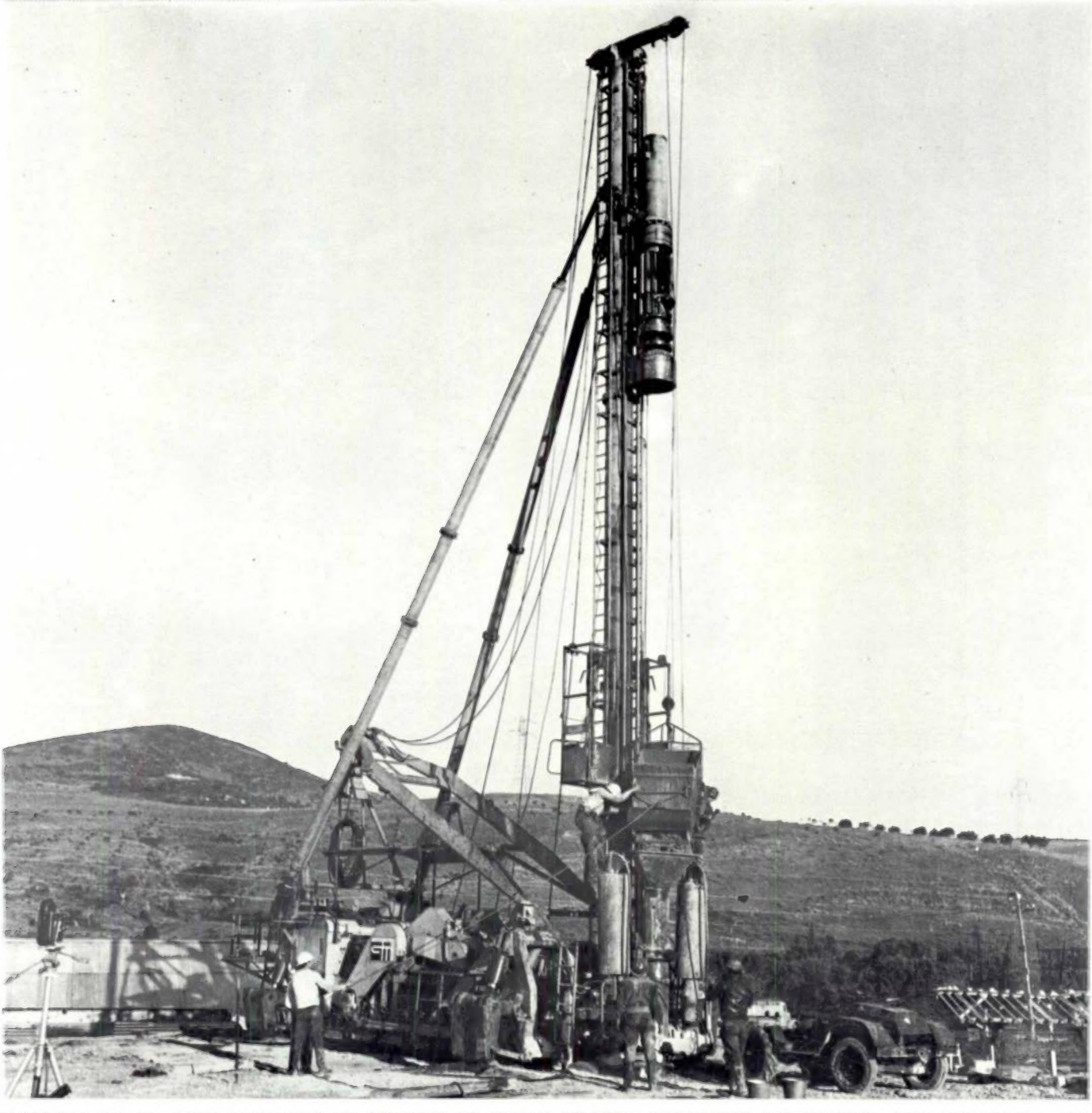
— J. Rebello da Silva: Traçado de diagramas de rendimento em colina para turbinas hidráulicas - Técnica n.º 348.

— J. M. Voith: Descrição do equipamento de ensaio para o Laboratório de Hidromecânica do I. S. T. — — Folheto Voith.

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

PRAÇA DO MUNICÍPIO, 13-3º TELEF. 366506 LISBOA 2

DELEGAÇÕES: CABO VERDE · ANGOLA · MOÇAMBIQUE

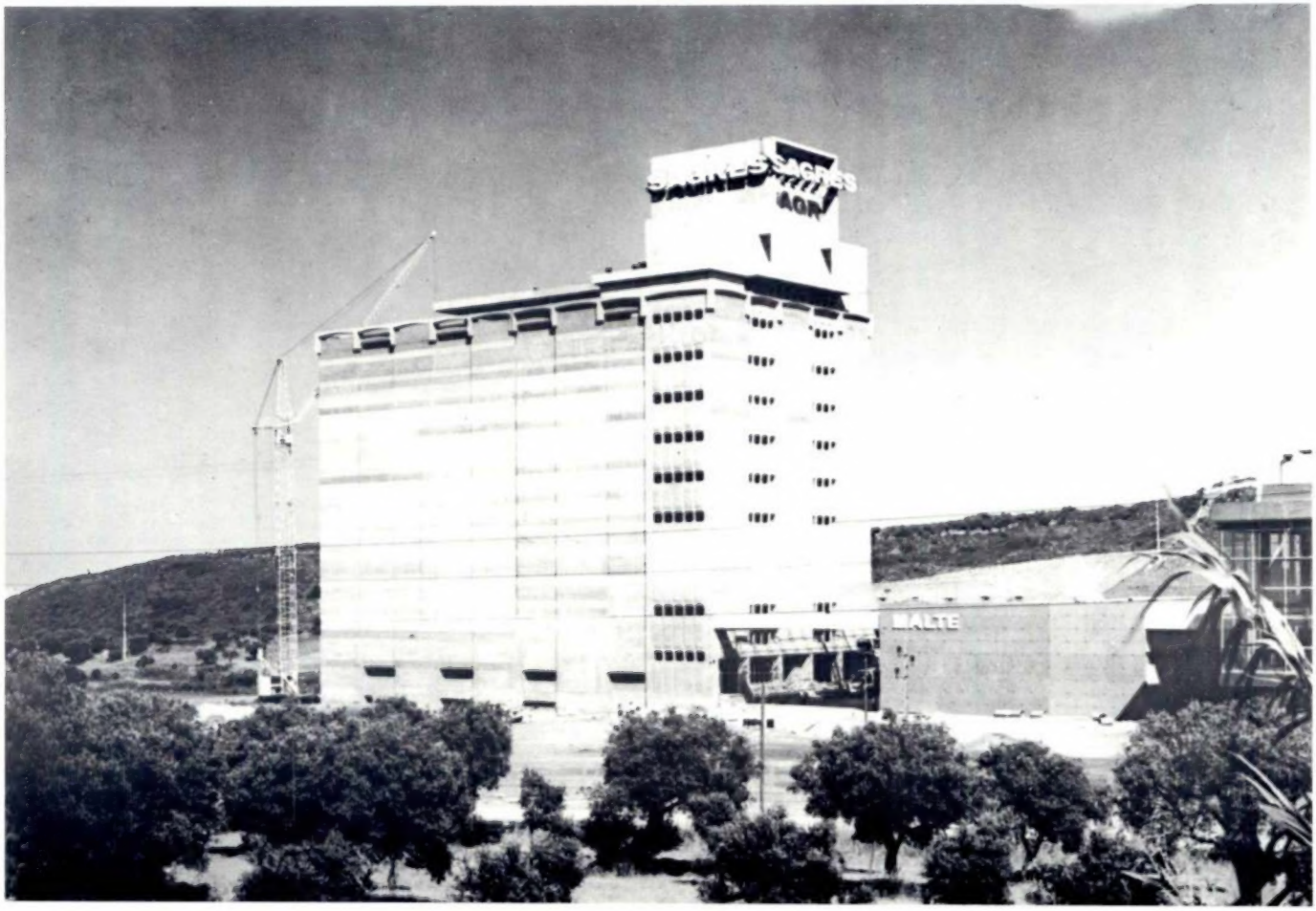


MÁQUINA CTL-66 PARA EXECUÇÃO DE ESTACAS DE BETÃO ARMADO, MOLDADAS NO TERRENO, COM DIÂMETROS ATÉ 60 CM E COMPRIMENTOS ATÉ 30 M. UMA DAS MAIS POTENTES E RÁPIDAS EXISTENTES NO MUNDO, PARA FUNDAÇÕES DESTE TIPO.

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

PRAÇA DO MUNICÍPIO, 13-3º TELEF. 366506 LISBOA 2

DELEGAÇÕES: CABO VERDE · ANGOLA · MOÇAMBIQUE



SOCIEDADE CENTRAL DE CERVEJAS

Silo para 20 000 t de cevada e malte, em Vialonga, totalmente executado com moldes deslizantes.

PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA • FUNDAÇÕES ESPECIAIS

OBRAS MARÍTIMAS E PORTUÁRIAS • PONTES E VIADUTOS

CONSTRUÇÕES CIVIS • CONSTRUÇÕES INDUSTRIAIS

C. D. U. 519.214.3:621.015

TESTES ESTATÍSTICOS SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DA POPULAÇÃO AMOSTRADA

Por ALEXANDRE G. CERVEIRA
Assist. C.E.E da C.E.E.N. do I.A.C.
Assistente do I.S.T.

RESUMO

Expõe-se a utilização de dois métodos de teste de hipóteses aplicados à análise de resultados experimentais. No caso em estudo a experimentação utilizou um gerador de impulsos de ocorrência aleatória com o fim de determinar se a sequência de impulsos do gerador se pode considerar um processo pontual de Poisson.

SYNOPSIS

A notice of the use of methods of hypothesis testing is given in connection with the analysis of experimental data. Specifically the data was obtained from a random occurence pulse generator in order to determine if the pulse sequence could be considered a Poisson point process.

1. INTRODUÇÃO

Segue-se a exposição de uma forma de análise de resultados experimentais no sentido de avaliar a sua compatibilidade com hipóteses teóricas de probabilidade. Recorrer-se-á a dois métodos estatísticos largamente conhecidos e ilustrar-se-á o texto teórico com uma aplicação concreta realizada no Centro de Estudos de Electrónica. Este artigo relata, portanto, a utilização de métodos estatísticos na investigação experimental em curso no Centro de Estudos de Electrónica e, por outro lado, é dedicado aos alunos da cadeira de «Probabilidades, erros e estatística», do I. S. T. com o fim de dar exemplo das aplicações e de indicar as potencialidades existentes na matéria daquela cadeira.

Justifica-se, pois, que a parte teórica tenha um fim meramente introdutório e de apresentação da notação; a bibliografia indicada poderá servir de guia ao estudo aprofundado dos assuntos expostos. A aplicação citada refere-se à efectuada no Centro de Estudos de Electrónica com um gerador de impulsos de ocorrência aleatória. A questão posta após a construção do gerador resumia-se a saber se a distribuição experimental podia ou não ser imputada à distribuição de Poisson. A utilização da análise indicada permite concluir que os resultados experimentais de que se dispõe não rejeitam a hipótese teórica, isto é, a experimentação feita é mais favorável à aceitação da lei de distribuição de Poisson de que à sua rejeição.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Considerar uma experiência aleatória com espaço de resultados Ω e uma partição completa desse espaço pela família de acontecimentos A_i com $i \in N^k$ (*). Teremos, portanto, o seguinte esquema ou matriz de probabilidades

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & \dots & A_k \\ p_1 & p_2 & p_3 & \dots & p_k \end{bmatrix} \qquad (1)$$

em que

$$\begin{cases} \forall i \in N^k \longrightarrow p_i = \text{Prob}\{A_i\} \\ \sum_{i=1}^{k} p_i = 1 \end{cases}$$

visto a partição completa exigir que $\bigcup_{i=1}^{k} A_i = \Omega$ e que $\forall i \neq j \longrightarrow A_i \cap A_j = \emptyset$ (acontecimento impossível ou subconjunto vazio).

Considerar que se realiza várias vezes a experiência aleatória e de tal forma que os resultados das várias repetições se possam considerar como

---

* Se k for um número natural por N^k e por N_o^k indicam-se os conjuntos de números inteiros assim definidos:

$$N^k = \{1, 2, 3, \dots, k\}$$
$$K_o^k = \{0, 1, 2, \dots, k\}$$

Se k for o símbolo ∞ o conjunto de números inteiros não tem limite superior.

acontecimentos mùtuamente independentes. A realização repetida da experiência conduz a uma dada frequência absoluta n_i para cada acontecimento A_i da partição e pode-se dizer que se obteve experimentalmente um esquema de frequências absolutas expresso pela matriz

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & \dots & A_k \\ n_1 & n_2 & n_3 & \dots & n_k \end{bmatrix} \qquad (2)$$

O número total de repetições da experiência aleatória é igual a $n = \sum_{i=1}^{k} n_i$.

Para verificar se estes resultados experimentais são estatìsticamente compatíveis com a distribuição teórica de probabilidades vamos recorrer aos métodos da estatística indutiva conhecidos por ensaio ou teste de hipóteses. Estes métodos vão permitir estabelecer o grau de confiança que a distribuição de frequências (2) nos dá àcerca da hipótese teórica expressa na distribuição de probabilidades (1).

Os testes de hipóteses a que nos vamos referir neste artigo baseiam-se na distribuição multinominal o que exige uma reestruturação do problema. Continua-se a admitir que as frequências absolutas resultam da realização repetida de uma experiência aleatória.

Considerar o resultado de cada uma das $n = \sum_{i=1}^{k} n_i$ experiências expresso pela variável aleatória k-dimensional W_j

$$W_j = (X_{1j}, X_{2j}, X_{3j}, \dots, X_{kj}) \qquad (3)$$

obedecendo às condições

$$a_1)\ \forall\, i \in N^k \longrightarrow X_{ij} \in N_o^1\ ; \qquad (4)$$

$$a_2)\ \sum_{i=1}^{k} X_{ij} = 1\,.$$

Notar que a realização do acontecimento A_i na experiência de ordem j ($j \in N^n$) implica que $X_{ij} = 1$.

Verifica-se, portanto, que as variáveis aleatórias W_j obedecem à uma distribuição multinomial dependente de um parâmetro p , k-dimensional

$$\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_k) \qquad (5)$$

que obedece às seguintes condições

$$b_1)\ \forall\, i \in N^k \longrightarrow p_i \in [0\,;1] \text{ (conjunto dos números reais pertencentes ao intervalo fechado)}; \qquad (6)$$

$$b_2)\ \sum_{i=1}^{k} p_i = 1\,.$$

A função de probabilidade pontual é função de k variáveis independentes (o vetor $\mathbf{x}$) e possui um parâmetro k-dimensional que é vetor $\mathbf{p}$

$$\begin{aligned} p_{W_j}(\mathbf{x}\,;\mathbf{p}) &= \\ &= p_{X_{1j}X_{2j}X_{3j}\dots X_{kj}}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k\,;\mathbf{p}) \\ &= \text{Prob}\left\{ \bigcap_{i=1}^{k} (X_{ij} = x_i) \right\} = \qquad (7) \\ &= \prod_{i=1}^{k} p_i^{x_i} \end{aligned}$$

obedecendo os k argumentos da função de probabilidade pontual a

$$\begin{aligned} &c_1)\ \forall\, i \in N^k \longrightarrow x_i \in N_o^1 \\ &c_2)\ \sum_{i=1}^{k} x_i = 1 \end{aligned} \qquad (8)$$

Verifica-se também que a função de probabilidade pontual é independente do índice j.

Temos, segundo esta forma de encarar o problema, um parâmetro k-dimensional que é desconhecido e a questão é verificar em face da amostra

$$\mathbf{w} = (W_1, W_2, W_3, \dots, W_n) \qquad (9)$$

em que os elementos são em si k-dimensionais, se é ou não admissível para o parâmetro $\mathbf{p}$ um dado valor

$$\mathbf{p}_o = (p_{o1}, p_{o2}, p_{o2}, \dots, p_{ok}) \qquad (10)$$

Apresentam-se seguidamente algumas noções que permitem enquadrar este problema na linguagem própria dos testes de hipóteses.

Os testes de hipótese formam um capítulo da estatística indutiva ligado à teoria da decisão que tem por fim o estabelecimento de certo tipo de *estratégias* de decisão.

As estratégias são funções com domínio no *espaço das amostras* S (um conjunto de resultados